

Quantentechnologie

Die zweite Generation

DROHNEN

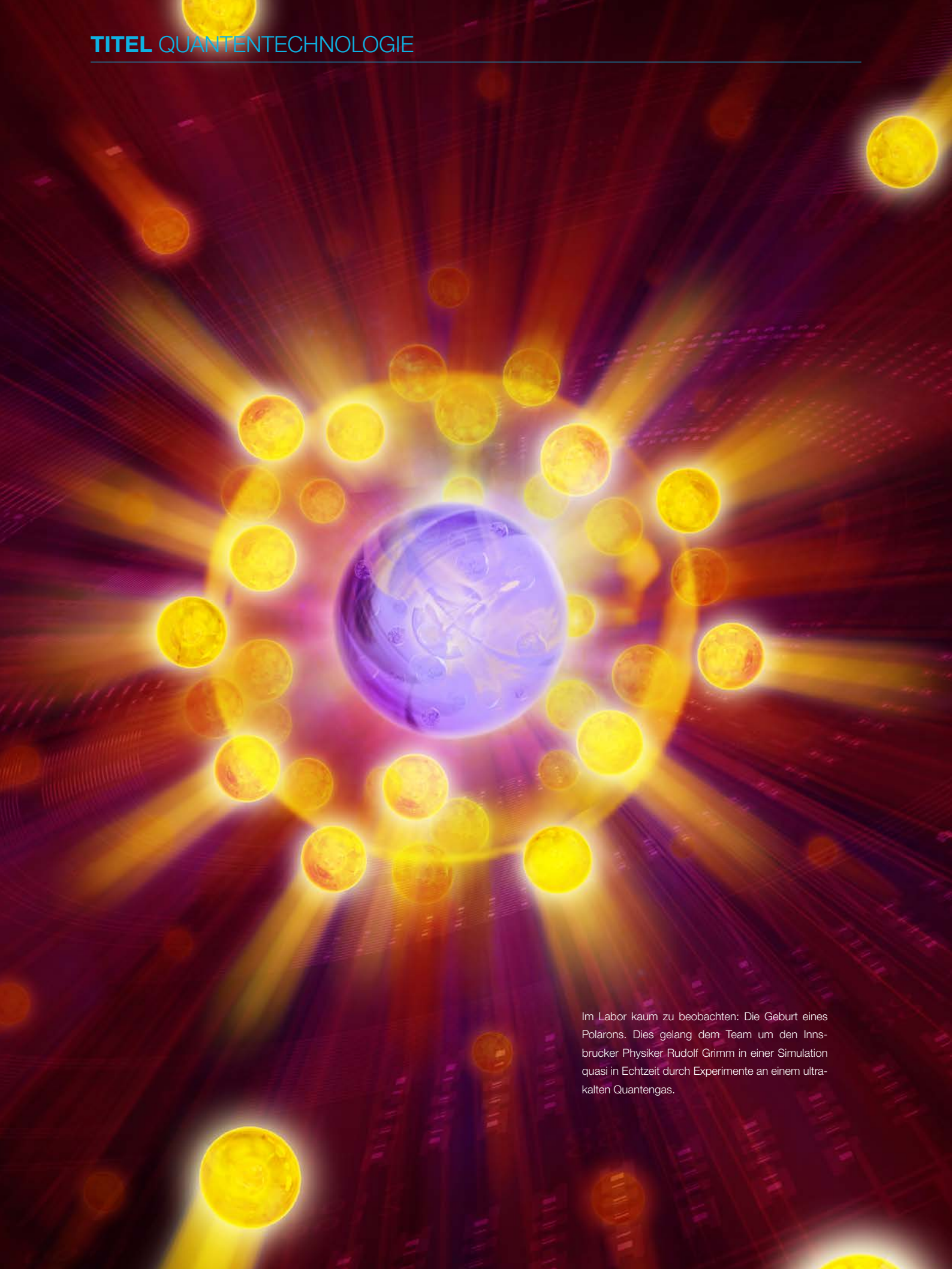
Ob als Zusteller für Pakete oder schon bald als fliegende Taxis: Drohnen erobern die Lüfte.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Hotspot für wissenschaftliche Exzellenz: Mit dem Cyber Valley verfolgt Baden-Württemberg große Pläne.

BLOCKCHAIN

Neue Perspektiven dank Blockchain-Technologie: Großes Potenzial bietet vor allem der Energiesektor.



Im Labor kaum zu beobachten: Die Geburt eines Polarons. Dies gelang dem Team um den Innsbrucker Physiker Rudolf Grimm in einer Simulation quasi in Echtzeit durch Experimente an einem ultrakalten Quantengas.

AUS DEM REICH DER QUANTEN

Die kleinsten Teilchen zeigen große Wirkung. Ohne sie hätten wir weder Laser und Transistoren noch Computer oder Internet. Nun erobern die Atome und Lichtteilchen auch das 21. Jahrhundert. Sie sollen die Informations- und Kommunikationstechnik revolutionieren und viele neue Anwendungen beflügeln. Auch Europa will auf den Innovationszug aufspringen und hat ein großes Förderprogramm für die Quantentechnologien gestartet.

VON DR. MANFRED LINDINGER

Die Quantentheorie hat Mitte des 20. Jahrhunderts zu der wohl größten physikalischen Umwälzung geführt. Mit ihr konnten erstmals die Eigenschaften von Lichtteilchen (Photonen), Elektronen, Atomen, Molekülen, von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern sowie aller Arten elektromagnetischer Strahlung beschrieben werden. Das tiefere Verständnis von quantenphysikalischen Vorgängen in Halbleitern und der Wechselwirkung von Licht mit Materie haben bahnbrechende Erfindungen wie den Laser, die Atomuhr, den Transistor und damit die moderne Elektronik, einschließlich Computer, Internet und Mobilfunk hervorgebracht. Nicht zu reden von medizinischen Geräten wie Magnetresonanz- und Computertomographen (MRT, CT). Diese Errungenschaften sind die Produkte der Quantentechnologie der ersten Generation.

Bezweifelten Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und andere Pioniere der Quantenphysik, dass Experimente mit einzelnen Atomen jemals möglich sein würden, können die Forscher heutzutage einzelne Atome, Moleküle und Photonen fast nach Belieben kontrollieren und manipulieren. Dank der Fortschritte in der Optik, Elektronik und Vakuumtechnik werden Atome mit Laserstrahlen fast routinemäßig bis auf den absoluten Nullpunkt

(minus 273 Grad Celsius) gekühlt und zum Stillstand gebracht. Mit elektrischen und magnetischen Feldern hält man die Teilchen dann für längere Zeit in der Schwebelage. Auch Lichtstrahlen können so weit abgebremst werden, dass sie nur noch im Schnecken tempo vorankommen.

Mit den experimentellen Möglichkeiten ist auch das Verständnis für die quantenphysikalischen Prinzipien gewachsen. Da Photonen, Elektronen oder Atome wie alle Quantenteilchen eine Zwitternatur besitzen und sich sowohl wie Partikel als auch wie Wellen verhalten, vollführen sie Dinge, die mit klassischer Physik nicht zu verstehen sind. Sie können unüberwindbare Hindernisse durchtunneln und sich so überlagern, dass sie zwei Quantenzustände gleichzeitig annehmen. Eine der größten Merkwürdigkeiten der Quantenphysik ist die Verschränkung: Quantenteilchen gehen dabei eine so innige Verbindung ein, dass sie sich auch noch über große Entfernungen auf geisterhafte Weise gegenseitig beeinflussen. Ein Phänomen, das Albert Einstein einst als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnete. Mithilfe der Verschränkung lassen sich Quanteneigenschaften seit einigen Jahren über große Distanzen von einem Teilchen auf ein anderes teleportieren (beamen). Da es den Physikern immer besser gelingt, die-



»Es wird hoffentlich bald ein Quanteninternet geben, in dem Quantencomputer miteinander kommunizieren. Dieses System wird aus Satelliten und kontinentalen Glasfasernetzen bestehen.«

PROF. DR. ANTON ZEILINGER, Präsident der Österreichischen Akademie der Wissenschaften



»Quantentechnologien der zweiten Generation werden Technologie und Gesellschaft vermutlich ähnlich verändern, wie es die Erfindung des Lasers seit 1960 getan hat.«

PROF. DR. RAINER BLATT, Institut für Quantenoptik und Quanteninformation, Universität Innsbruck



»Die Quantentechnologien erlauben es, leistungsfähige Quantensimulatoren und Quantencomputer zu bauen, wobei die Grenze zwischen beiden immer mehr verschwinden wird.«

PROF. DR. IMMANUEL BLOCH, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching



»Das EU-Flaggschiff ermöglicht es, die Spitzenstellung der europäischen Forschung auf diesem für künftige technische Entwicklungen so wichtigen Gebiet zu erhalten und auszubauen.«

GÜNTHER OETTINGER, EU-Kommissar für digitale Wirtschaft und Gesellschaft

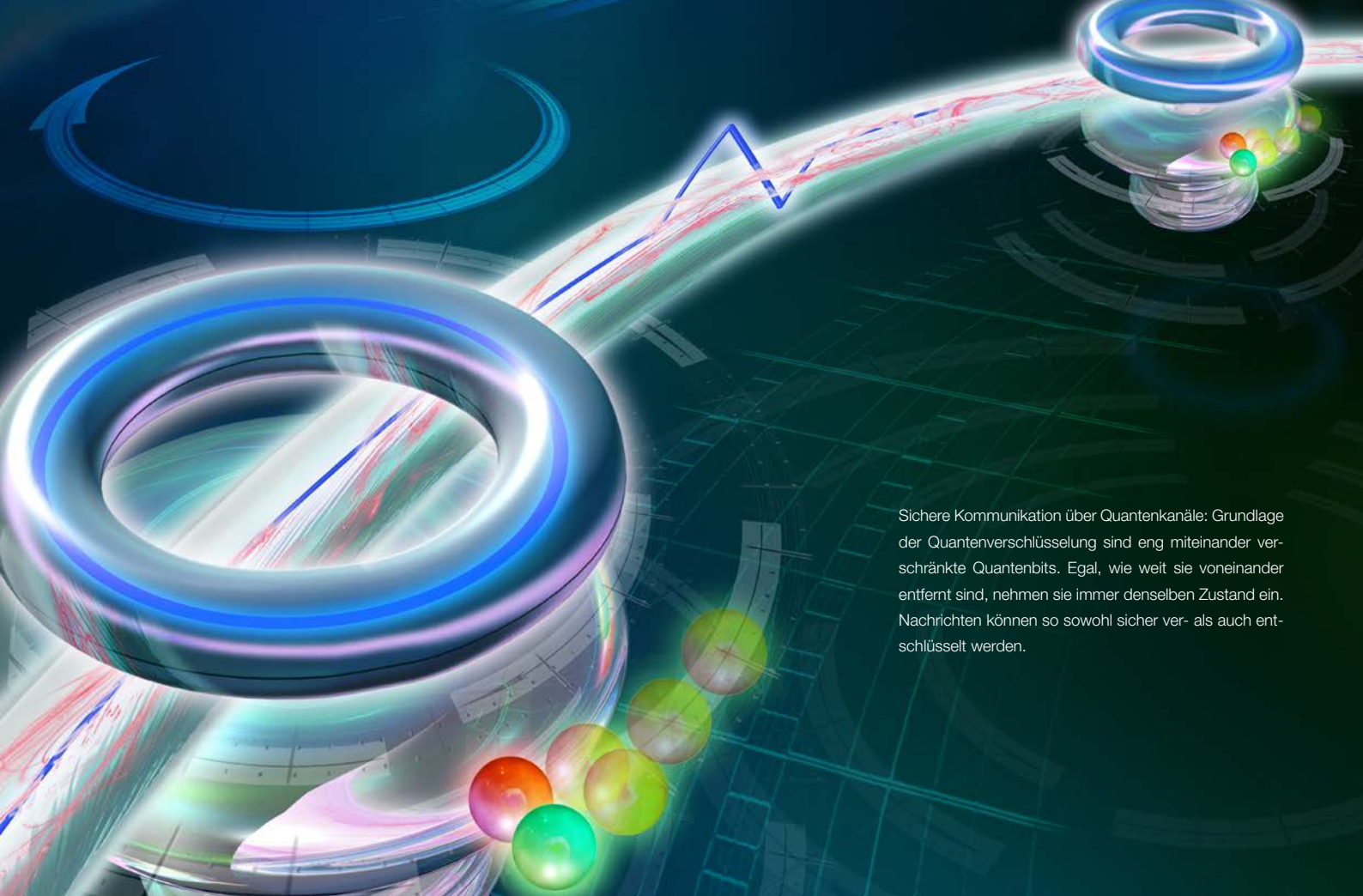
se Phänomene experimentell zu nutzen, haben sich eine Reihe potenzieller Anwendungen eröffnet, die noch vor einiger Zeit undenkbar waren. Informationsverarbeitung, Datenübertragung, Messtechnik und Sensorik scheinen davon am meisten zu profitieren. Angesichts der neuartigen Möglichkeiten sprechen Wissenschaftler, Ingenieure und Wirtschaftsexperten bereits von der Quantentechnologie der zweiten Generation.

Quantenkryptographie lässt Lauschern keine Chance

Die Quantenkryptographie ist wohl die am weitesten fortgeschrittene Quantentechnologie. Hierbei geht es wie bei allen Verschlüsselungstechniken um die sichere Codierung und Übertragung vertraulicher Nachrichten. Sie ist den klassischen Verfahren überlegen, die darauf beruhen, dass es einer enormen Rechenleistung bedarf, eine große Zahl in ein Produkt von Primzahlen zu zerlegen. Übermittelt man nun eine quantenverschlüsselte Nachricht, codiert etwa in einer Abfolge von einzelnen Lichtquanten, so hat ein Lauscher keine Chance, unentdeckt zu bleiben. Quantenobjekte erhalten nämlich ihre Eigenschaften erst dann, wenn man sie beobachtet, also einer Messung unterwirft. Weil jeder Lauschangriff eine Messung darstellt, verändert er auch merklich die Bitfolge des Quantencodes, was Sender und Empfänger sofort bemerken. Der Lauschangriff fliegt auf.

Ein häufig verwendetes quantenkryptographisches Verfahren beruht darauf, dass man eine zufällige Folge von Bits mit einzelnen Lichtteilchen, die in unterschiedliche Richtungen schwingen, austauscht. Der Empfänger misst diese Polarisationszustände und vergleicht anschließend sein Ergebnis mit der Bitfolge des Senders. Stimmt der Schlüssel auf beiden Seiten perfekt überein, wird die eigentliche Nachricht übertragen. Ein Lauscher verrät sich dadurch, dass er eine Fehlerrate bei der Übertragung erzeugt. Dieses Verfahren ebenso wie die quantenmechanische Verschränkung von Lichtteilchen funktioniert mittlerweile zuverlässig über große Entfernungen. Physiker der Universität Genf übertrugen im Jahr 2009 erstmals einen Quantenschlüssel mit Photonen über eine 150 Kilometer lange Glasfaser zwischen Genf und Neuchâtel. Den Streckenrekord halten seit Kurzem chinesische Wissenschaftler: Sie haben eine 2000 Kilometer lange abhörsichere Datenleitung zwischen Peking und Shanghai errichtet (siehe Interview).

Dass es möglich ist, quantenmechanisch verschlüsselte Daten 144 Kilometer weit direkt durch die Atmosphäre zu übertragen, haben die Physiker um Prof. Dr. Anton Zeilinger von der Universität Wien wiederholt demonstriert. Diese Freilandversuche waren Vorbereitungen für den nächsten Schritt: den Austausch von Quantenschlüsseln zwischen einem erdnahen Satelliten und mehreren Bodenstationen. Eine quantengestützte Datenleitung zwischen zwei Teilnehmern aufzubauen ist vergleichsweise leicht, es bedarf aber eines ungemein größeren technischen Aufwands, mehrere Teilnehmer miteinander zu vernetzen. Hierzu laufen in einigen Städten bereits Pilotprojekte.



Sichere Kommunikation über Quantenkanäle: Grundlage der Quantenverschlüsselung sind eng miteinander verstränkte Quantenbits. Egal, wie weit sie voneinander entfernt sind, nehmen sie immer denselben Zustand ein. Nachrichten können so sowohl sicher ver- als auch entschlüsselt werden.

Quantensimulatoren ermöglichen maßgeschneiderte Werkstoffe

Eine weitere Errungenschaft der Quantentechnologie der zweiten Generation ist der Quantensimulator. Mit ihm könnten Materialforscher im Voraus ermitteln, welche Materialeigenschaften für eine anvisierte Anwendung optimal wären und dann ihren Werkstoff entsprechend maßschneidern. Bislang sind Wissenschaftler für ihre Simulationen auf die leistungsfähigsten Computer angewiesen. Doch diese sind als klassische Rechner meist überfordert, komplexe quantenphysikalische Phänomene wie Magnetismus, Elektrizität oder Supraleitung, bei denen meist eine große Zahl von Teilchen beteiligt sind, im Detail zu berechnen. Diese grundlegende Hürde erkannte der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman bereits 1981, als die Theoretiker die ersten Konzepte für Rechenmaschinen ersannen, die nach den Regeln der Quantenphysik arbeiten (siehe Seite 18 f). Ein Ausweg ist ein „künstliches“ Quantensystem, das vollkommen kontrolliert werden kann. Seitdem sind viele Ansätze für Quantensimulatoren entwickelt worden. Forscher um Prof. Dr. Immanuel Bloch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München nutzen beispielsweise tiefgekühlte Atome, die in einem von Laserstrahlen aufgespannten regelmäßigen optischen Gitter angeordnet sind. Die Atome verhalten sich auf ihren Gitterplätzen wie die Leitungselektronen in einem Festkörper, lassen sich

aber leichter manipulieren und beobachten. Dass man auch Prozesse der Teilchenphysik mit Atomen nachbilden kann, haben Forscher um Prof. Dr. Peter Zoller und Prof. Dr. Rainer Blatt von der Universität Innsbruck demonstriert. Ihr Quantensimulator besteht aus vier Kalziumionen, die in der Schwebelage gehalten und von Laserstrahlen kontrolliert werden. Die Innsbrucker Physiker konnten so erste Einblicke in komplizierte Vorgänge gewinnen, die sich bei den aufwendigen Kollisionsexperimenten in Teilchenbeschleunigern abspielen. Trotz der Fortschritte handelt es sich bei den gegenwärtigen Quantensimulatoren noch immer um rudimentäre Systeme, die nur ansatzweise an Feynmans Vision heranreichen. Sie sind noch immer zu klein, um die komplexen Vorgänge in Halbleitern oder Supraleitern umfassend nachahmen zu können. Aber schon jetzt stoßen die Möglichkeiten, mit Quantensimulatoren maßgeschneiderte Werkstoffe zu entwickeln und die Ursachen von Materialfehlern schneller zu identifizieren, auf zunehmendes Interesse in der Industrie.

Eine Entwicklung, die ebenfalls kurz davor steht, den Weg in die Praxis zu finden, sind Atomuhren, die sichtbares Licht als Taktgeber nutzen. Diese Zeitmesser sind angetreten, die technisch ausgereizten Cäsium-Atomuhren zu ersetzen, die auf Basis der langwelligen Mikrowellenstrahlung arbeiten. Weil Lichtwellen sehr viel schneller oszillieren, lässt sich die Genauigkeit von Atomuhren um einige Größenordnungen steigern, wovon viele Anwendungen profitieren dürften – von der Satellitennavi-

EU-FLAGGSCHIFF

»Wir könnten den Anschluss an die Weltspitze verlieren«

Die moderne Quantentechnologie wird als nächste große Innovation gepriesen, die Brüssel mit einer Milliarde Euro kräftig fördern will. Prof. Dr. Tommaso Calarco von der Universität Ulm hat die jüngste EU-Initiative auf den Weg gebracht. Er spricht über Chancen, erste Anwendungen und weltweite Aktivitäten.



PROF. DR. TOMMASO CALARCO

Direktor des Instituts für komplexe Quantensysteme, Universität Ulm, und Mitverfasser des „Quanten-Manifests“.

Was ist das Besondere an der Quantentechnologie?

Wir alle tragen bereits Quantentechnologie in der Tasche, etwa als Smartphones. Wir laden unentwegt digitale Fotos hoch, die über Glasfaser mit Laserpulsen übertragen werden. Ohne die Erkenntnisse der Quantentheorie hätten wir weder Laser noch Transistor. Wovon wir jetzt sprechen, ist die Quantentechnologie der zweiten Generation. Hier spielen einzelne Quanten die zentrale Rolle, dadurch sind genauere Atomuhren und empfindlichere Sensoren möglich. Daten lassen sich abhörsicher übertragen und mit Quantencomputern schneller verarbeiten, als ein Supercomputer es je könnte. Quantenphänomene sind nicht länger von rein akademischem Interesse, sondern bekommen praktische Bedeutung.

Wo sind die ersten Durchbrüche zu erwarten?

Erste Erfolge sind bereits in der Quantenkommunikation zu verzeichnen. Zwischen Peking und Schanghai ist eine sichere Datenautobahn fertiggestellt worden. Die EU-Kommission erwägt, sichere Datenverbindungen zwischen Banken und Behörden in Europa zu schaffen. Auch bei Quantensimulatoren und in der Quantensensorik tut sich bereits einiges.

Wird auch der Normalbürger von der Quantentechnologie profitieren?

Präzise Quantenuhren sollen auf den europäischen Galileo-Satelliten installiert werden, um die Satellitennavigation zu verbessern. Die Auflösung bei der Positionsbestimmung würde dann nur einige Millimeter betragen. Davon würden viele Bürger profitieren, etwa wenn selbstfahrende Autos den Straßenverkehr erobern. Wir arbeiten an unserem Institut an Quantensensoren für die medizinische Diagnostik. Einzelne Tumorzellen könnten damit in vivo aufgespürt werden. Neuroerkrankungen ließen sich möglicherweise besser behandeln, aber auch Computer und intelligente Prothesen mit Gedankenkraft effizienter steuern.

Ist zu befürchten, dass Europa den Anschluss an die Weltspitze verpassen könnte, obwohl man derzeit gut aufgestellt ist?

Ein klares Ja! Wenn wir in Europa jetzt nicht die Weichen stellen und die Quantentechnologie gezielt fördern, werden wir in einigen Jahren den Anschluss an die Weltspitze verlieren. Noch sind wir in vielen Feldern führend. Doch das könnte sich angesichts der Aktivitäten in China, Japan und in den Vereinigten Staaten bald ändern. IBM, Google, Microsoft und Intel investieren seit einiger Zeit große Summen in die Entwicklung

»Quantenphänomene sind nicht länger von rein akademischem Interesse, sondern bekommen praktische Bedeutung.«

von Quantencomputern. Microsoft hat gerade drei prominente europäische Quantenphysiker abgeworben. In Europa gibt es derzeit kein Unternehmen, das die Quantentechnologie in so großem Maßstab fördern könnte, wie es die amerikanischen IT-Unternehmen tun.

Und das soll die EU-Flaggschiff-Initiative ändern?

Die EU-Kommission hat die weltweiten Bestrebungen erkannt und vor einem Jahr die dritte Flaggschiff-Initiative ins Leben gerufen, die die Quantentechnologie in Europa gezielt fördern soll. Eine Milliarde Euro werden in den kommenden zehn Jahren bereitgestellt. Derzeit werden die verschiedenen Aktivitäten koordiniert und Projekte zwischen Industriepartnern und Forschungsinstituten entwickelt. Große internationale Konzerne wie Bosch, Airbus oder Thales sowie viele kleinere Start-up-Firmen zeigen bereits großes Interesse. Wir wollen von den Erfahrungen der bereits existierenden Flaggschiffen lernen, wo es in einigen Fällen Interessenkonflikte zwischen den Entscheidern und den Wissenschaftlern gab. Wir wollen die Rollen anders verteilen und eine Konzentration auf einzelne Personen und Institute vermeiden. Und damit wir zügig loslegen können, ist bereits in diesem Frühjahr das Projekt „QuantERA“ angelaufen, zu dem sich 26 EU-Länder zusammengeschlossen haben, um schon vor dem Start des Flaggschiffes im nächsten Jahr die Quantentechnologien zu fördern.

Das Interview führte Manfred Lindinger

gation über die Erdvermessung bis hin zur elektronischen Kommunikation. Nicht zuletzt hoffen Wissenschaftler, die Basiseinheit der Zeit, die „Sekunde“, neu definieren zu können. Die besten optischen Atomuhren erreichen eine Genauigkeit von 10^{-18} . Das bedeutet: Diese Chronometer gehen nach drei Milliarden Jahren nur um etwa eine Sekunde falsch.

Die Quantenphysik ermöglicht den Bau hochempfindlicher Sensoren, um etwa Druck, Temperatur, Position, Beschleunigung sowie Gravitationskräfte, magnetische und elektrische Felder zu messen. Durch die Nutzung quantenphysikalischer Prinzipien lassen sich Genauigkeiten erreichen, die mit klassischen Systemen nicht zu erreichen sind. Als künftige Bewegungssensoren können extrem kalte Quantengase dienen. Die Atome darin sind so kalt, dass sie ihre individuellen Teilcheneigenschaften verlieren und sich wie quantenmechanische Materiewellen verhalten. Mit solchen ultrakalten Quantengasen wollen Physiker vom Weltraum aus das Gravitationsfeld der Erde genauer vermessen.

Künstliche Diamanten eignen sich perfekt als hochsensible Sensoren

Hoch im Kurs für präzise Magnetfeldsonden stehen winzige künstliche Diamanten. Diese Sensoren sind mittlerweile so empfindlich, dass sie sogar noch magnetische Felder messen, die von den Spins einzelner Elektronen oder Atomkernen stammen. Das Geheimnis sind Defekte im Kristallgitter, die von Stickstoffatomen und benachbarten Fehlstellen herrühren. Diese als Farbzentren bezeichneten Stickstoff-Fehlstellen (NV-Zentren) haben es in sich. Sie senden, nachdem sie von einem grünen Laserpuls angeregt wurden, rote Lichtquanten aus, weshalb Diamanten auch eine ideale Quelle für einzelne Photonen sind und bereits in der Quantenkryptographie genutzt werden. Zum Messen von Magnetfeldern nutzt man den Spin der Fehlstellen. Die Diamantsonden funktionieren ähnlich wie das eingangs erwähnte, in der Medizin wichtige bildgebende Verfahren MRT. Die Diamantsensoren sind nur weitaus empfindlicher, benötigen keinen starken Magneten und arbeiten bei Raumtemperatur.

Eine Anwendung, an der zum Beispiel die Forscher um Prof. Dr. Tommaso Calarco vom Institut komplexer Quantensysteme der Universität Ulm arbeiten (siehe Interview), ist die Magnetenzephalographie. Dabei misst man mit den winzigen Magnetometern die schwachen Magnetfelder des Gehirns. Die magnetischen Signale werden durch die elektrischen Ströme aktiver Nervenzellen verursacht. Anhand dieser Signale lässt sich etwa der Ausgangsort epileptischer Anfälle genauer lokalisieren. Calarco und seine Kollegen sind bereits in der Lage, die magnetische Aktivität einer einzelnen Nervenzelle zu registrieren. In vivo wurden sie bereits als leuchtende Marker in die Blutbahn von Mäusen injiziert. Entsprechend chemisch funktionalisiert können sie die sich ausbreitenden Tumorzellen aufspüren. Die vielen Möglichkeiten der leuchtenden Magnetsensoren haben bereits das Interesse einiger Firmen geweckt. Bosch arbeitet mit den Ulmer Physikern an einer

Hirn-Maschinen-Schnittstelle. Damit sollen gelähmte Patienten einen Computer steuern oder über Prothesen wieder fühlen können.

Milliardenschwere EU-Flaggschiff-Initiative als An Schub für die Quantenphysik

Europa – insbesondere Deutschland und Österreich – ist in den hier erwähnten Feldern der Quantentechnologie im internationalen Vergleich gut aufgestellt und nimmt bei zahlreichen Entwicklungen eine Führungsrolle ein. Dennoch bedarf es nach Ansicht der meisten Wissenschaftler vor allem der politischen Weichenstellung. Man befürchtet, dass man ohne großzügige Förderung den Anschluss an die Weltspitze verlieren könnte. Die Sorge ist nicht unbegründet: Große amerikanische Computer- und Internetkonzerne investieren Millionen von Dollars in die Entwicklung von Quantencomputern.

Mit einer Flaggschiff-Initiative hat die Europäische Kommission auf die weltweiten Bestrebungen reagiert. Das Programm wurde im vergangenen Jahr von Günther Oettinger, dem EU-Kommissar für digitale Wirtschaft und Gesellschaft, auf den Weg gebracht. Es umfasst eine Milliarde Euro und soll die Entwicklung der Quantentechnologien in Europa beschleunigen. Das Ziel ist die Bündelung der europaweiten Forschungsaktivitäten an den Instituten und in der Industrie und durch eine langfristige Förderung die Quantentechnologien möglichst schnell zur Anwendungs- und Marktreife zu führen.

Derzeit arbeitet eine Expertengruppe Ziele und Empfehlungen für die Initiative aus. Forschungseinrichtungen und Firmen sind aufgerufen, gemeinsame Projektvorhaben einzureichen. Der Fahrplan ist klar: Man will in den kommenden Jahren extrem genaue und robuste optische Atomuhren präsentieren. Im gleichen Zeitraum sollen erste Quantensensoren auf den Markt kommen. Länger wird es wahrscheinlich dauern, bis ein Quantennetzwerk alle größeren europäischen Städte verbindet. Der erste leistungsfähige universelle Quantencomputer wird für das Jahr 2035 anvisiert. Da einen Teil der Förderung die Mitgliedsländer selbst aufbringen werden, hat das Bundesforschungsministerium die Nationale Initiative „Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen“ (QUTEGA) gestartet. Das Ansinnen ist dem des EU-Flaggschiffs ähnlich: Die Empfehlungen sollen den Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft helfen, die Weichen für die Zukunftstechnologie zu stellen.

So könnte schon bald die zweite Quantenrevolution zu einer ähnlichen technologischen Umwälzung führen wie die erste Quantenrevolution im vergangenen Jahrhundert.

DR. MANFRED LINDINGER

ist F.A.Z.-Redakteur im Ressort „Natur und Wissenschaft“. Seine Hauptthemen sind Physik, Chemie sowie Astronomie, Raumfahrt und Mathematik.



QUANTENCOMPUTER

Wenn Quanten rechnen

Die Welt der kleinsten Teilchen tickt in einem ganz eigenen Takt. Um ihn zu verstehen, haben die besten Wissenschaftler unserer Zeit mehrere Jahrzehnte gebraucht. Heute nutzen sie die Besonderheiten der Quantenphysik, um eine völlig neue Generation von Computern zu bauen. Sie werden schneller, leistungsfähiger und komplizierter sein als alles, was bisher da war.

VON STEPHAN FINSTERBUSCH

Die Zukunft steht ganz hinten in der Halle. Am Ende des Ganges des Zukunftslabors von IBM sagt Konzernsprecher Detlef Rehm: „Hier ist er also“. In einer gläsernen Vitrine steht ein golden glänzendes Metallgerüst, kaum höher als ein Kuchenständer. Das Gerät besteht aus vier kreisrunden Platten, einem halben Dutzend Längsstäben, Querstreben, Drähten und Kabeln: einer der ersten funktionsfähigen Quantencomputer der Welt.

Quantencomputer funktionieren nach den Gesetzen der Quantenmechanik. Die Verarbeitung der Informationen folgt hier nicht der klassischen Informatik oder Di-

gitaltechnik, vielmehr nach dem Superpositionsprinzip sowie der Quantenverschränkung. Insofern arbeiten die Quantenrechner auch nicht mit Bits und Bytes, sondern mit Quantenbits oder Qubits (siehe Kasten).

Der von IBM vorgestellte Quantenrechner soll leistungsfähiger sein als alle heutigen Großrechner zusammen; er soll Datenbanken vom Ausmaß ganzer Shoppingmalls binnen Sekundenbruchteilen durchforsten, jede Verschlüsselung knacken, sämtliche ihm gestellten Rechenaufgaben lösen und mehr Antworten anbieten können, als Fragen im Raum stehen. Vor zehn Jahren war der Bau einer solchen

Wundermaschine reine Theorie. Nach einigen Streitereien unter den größten Physikern der Moderne, nach jahrelangen theoretischen Vorarbeiten und milliardenschweren Investitionsprogrammen, haben sich Ingenieure, Forscher und Wissenschaftler nun an die Arbeit gemacht. Sie bauen die Computer dieser neuen Generation.

Parallel statt sequenziell ermöglicht blitzschnelle Rechenleistungen

Arbeiten herkömmliche Rechner ihre Aufgaben nacheinander und Schritt für Schritt ab, gehen Quantenrechner ihre Rechenoperationen parallel an und lösen sie blitzschnell auf einen Schlag. Arbeitet ein heutiger PC die Information rasend schnell in Milliarden von Einsen oder Nullen ab, rechnet ein Quantenrechner mit beiden Zuständen zur gleichen Zeit. Er hat die logische 1 ebenso im Blick wie die 0, das „Ja“ ebenso wie das „Nein“. Er arbeitet im Graubereich der physikalischen Erklärbarkeit. Denn er nutzt die Prinzipien der Quantenphysik – und die haben es in sich.

Die Welt der Quanten ist schwer zu verstehen. Ein Quantenteilchen kann an zwei Orten gleichzeitig sein, sich mit einem anderen Teilchen erst verschränken, sich dann wieder lösen und auf das andere Teilchen über riesige Distanzen quasi beziehungslos einwirken. Mit diesen Phänomenen haben sich die größten Physiker der Moderne beschäftigt. Werner Heisenberg hatte 1925 den Begriff „Quantenmechanik“ geprägt und wie Richard Feynman davor gewarnt zu behaupten, dass man sie verstehe. Dennoch lässt sie sich schon heute bereits teilweise nutzen. Laserstrahlen, Atomuhren, Handys oder Laptops, das ganze digitale Instrumentarium unserer Zeit basiert letztlich auf Quantenmechanik, auch wenn uns das nicht bewusst ist.

Kontrolle über die höchst fragilen Quantenzustände der Atome

Seit Feynman in seinem Workshop „Physik und Berechenbarkeit“ am California Institute of Technology 1981 die Frage aufgeworfen hatte, ob Quantenphysik die Arbeit klassischer Computer nachahmen kann, hat sich mit der Quanteninformatik eine Disziplin herausgebildet, die sich auf die Suche nach Antworten auf die Frage des Nobelpreisträgers begeben hat. Mit Erfolg. Die für die Quantencomputer nötigen Qubits (siehe Kasten) lassen sich aus allem erzeugen, was sich nach den Regeln der Quantenmechanik verhält: Atome, Elektronen und Lichtteilchen. Die Forschung ist mittlerweile in der Lage, die höchst fragilen Quantenzustände von Atomen sowohl zu kontrollieren als auch zu manipulieren. So werden in Laboratorien von IBM, Google oder auch Facebook Ionen gezielt mit Laserlicht beschossen. Das Licht soll tief in den Atomen die Strukturen lockern und die dort um einen Kern kreisenden Elektronen in verschiedene energetische Zustände bringen. Die Teilchen werden quasi auf neue Bahnen verschoben. Dieser Vorgang lässt sich für das Rechnen der Quantencomputer nutzen. Dafür gibt es verschiede-

INFORMATION

Rechenweise des Quantencomputers

Arbeitet jeder PC nach den Regeln der binären Algebra mit Bits, welche die Werte 0 oder 1 annehmen, rechnet ein Quantencomputer mit Quantenbits oder abgekürzt Qubits. Das ist eine quantenphysikalische Informationseinheit, die nicht nur den binären Zustand, also 0 oder 1, sondern auch dazwischenliegende Zustände annehmen kann – und das alles simultan. So sind bei nur einem Qubit mit 0 und 1 zwei Zustände, bei zwei Qubits vier Zustände auf einmal möglich: 0/0, 1/0, 0/1, 1/1. Bei zehn Qubits existieren 1024 Zustände; bei 100 Qubits hat man schon mehr Rechenleistung als alle heutigen Computer in der Welt zusammen; 300 Qubits lassen mehr Möglichkeiten zu, als es Sandkörner auf Hawaii gibt. So wächst die Zahl der Kombinationen in einem Quantencomputer exponentiell mit der Anzahl seiner Qubits.

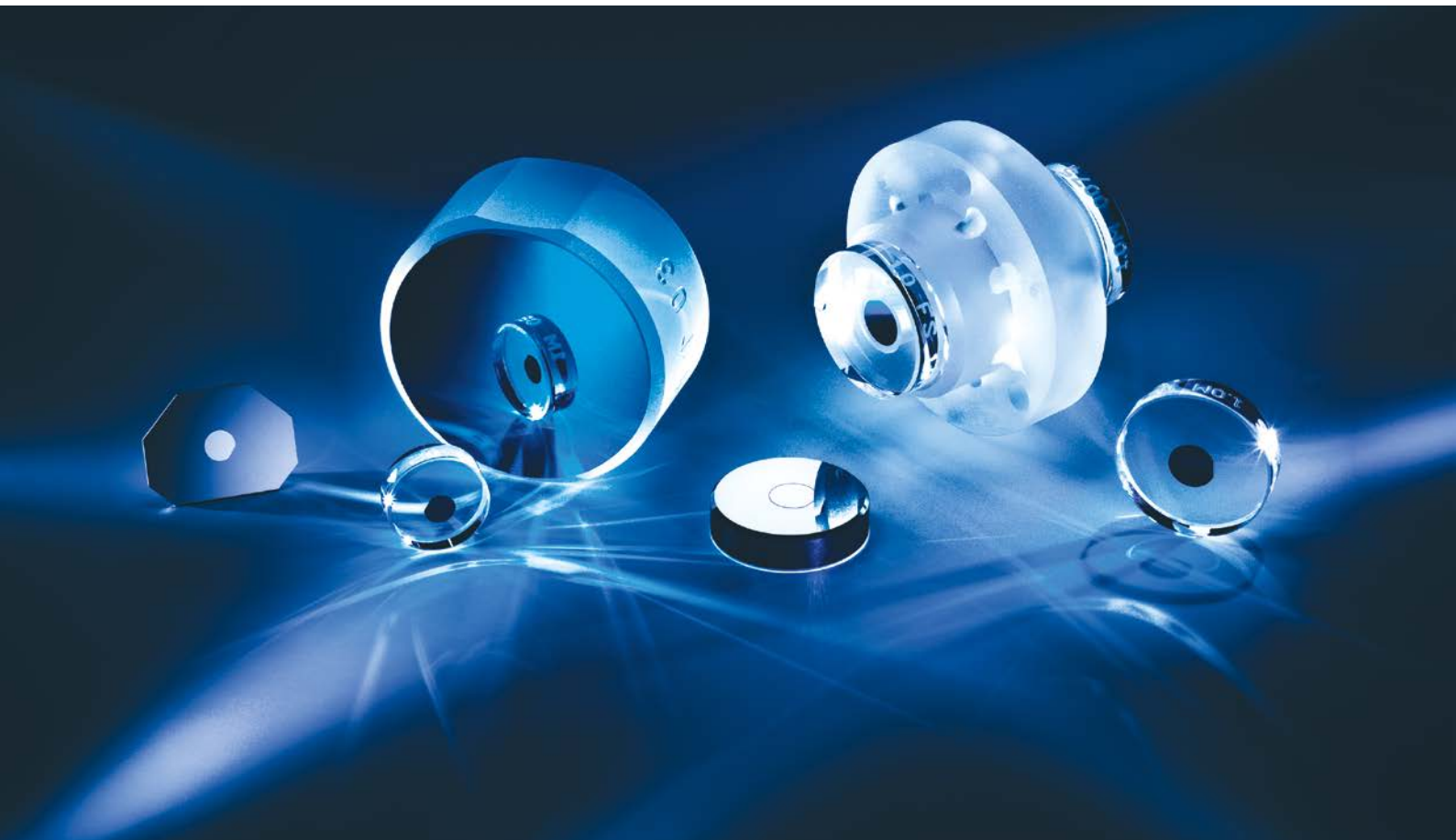
ne Mittel und Wege, wie die Qubits gespeichert, miteinander verschränkt und in der Rechnerstruktur genutzt werden können.

Die verschiedenen Ansätze sind hochkomplex und allesamt noch in der Entwicklung. Sämtliche Systeme aber haben eines gemeinsam: Sie benötigen einen riesigen Aufwand. Es bedarf empfindlichster Elektronik, in deren Umgebung jegliches Störsignal unterdrückt wird; es bedarf extrem kalter Temperaturen, um sämtliche Widerstände der verwendeten Materialien zu brechen und Strom völlig frei fließen lassen zu können. Denn unerwünschte Umwelteinflüsse zerstören die fragilen Quantenzustände und beeinträchtigen die Funktionsfähigkeit der künstlichen Rechenhirne.

Als aussichtsreichste Kandidaten für die Speicherung von Quantenbits gelten elektrische Schaltkreise, die in supraleitende Mikrochips integriert sind. Ihr Vorteil: Quantenprozessoren lassen sich mit den bekannten Verfahren der Halbleitertechnik fertigen und können zwecks Leistungssteigerung beliebig miteinander verbunden werden. Das eröffnet völlig neue Welten. Konzerne wie Google, Facebook oder der kanadische Computerbauer D-Wave sind allesamt am Thema dran. Die angelsächsischen Geheimdienste stecken Milliarden Dollar in die Forschung und Entwicklung dieser neuen Generation von Rechnern, China baut seit fünf Jahren an einem Quantencomputer. Die Europäische Kommission hat Quantentechnologie zu einem Flaggschiffprojekt erhoben. Die Wissenschaft arbeitet sich Schritt für Schritt nach vorn, um mit der Leistungskraft eines Quantenrechners einmal mathematische Probleme zu lösen, von denen man heute noch nicht einmal ahnt, dass es sie gibt.

STEPHAN FINSTERBUSCH

ist Redakteur der F.A.Z. Er berichtet für die Wirtschaftsredaktion unter anderem über die Computerbranche und ist im F.A.Z. Magazin für die Wissenschafts- und Technikseiten zuständig.



FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Reif für die Praxis

Es hat etwas gedauert, bis die Industrie das Potenzial der Quantentechnologie erkannt hat. Nicht zuletzt dank der Forschung und cleverer Start-ups wird sie inzwischen für verschiedenste Anwendungen genutzt. Beste Beispiele sind die Sensorik sowie die Kryptographie, mit der bereits Geld verdient wird. Doch der Weg von den Forschungslabors in die Produktentwicklung ist weit.

VON MARKUS STREHLITZ

„Die Zeit ist reif“, sagt Christoph Marquardt, wenn er auf konkrete Anwendungen der Quantentechnologie angesprochen wird. Marquardt ist Gruppenleiter am Max-Planck-Institut und Mitglied im Planungskomitee der QUTEGA-Initiative (Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen). Deren Ziel ist es, den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zu fördern.

Man habe lange gebraucht, um die Quantentechnologie zu verstehen. „Aber mittlerweile lässt sich abschät-

zen, wie man sie nutzen und entsprechende Anwendungen umsetzen kann.“ Die Industrie habe aufgehört, so Marquardt. Unternehmen seien nun stärker an den Möglichkeiten interessiert, die die Quantenphänomene eröffnen, als dies noch vor ein paar Jahren der Fall gewesen sei.

Besonders anschaulich wird dies bei der Quantenkryptographie. Hier ist der Transfer von den Labors in die Produktentwicklung bereits am weitesten fortgeschritten. „Gerade als in den 90er-Jahren deutlich wurde, dass ein

Quantencomputer eines Tages die bisherigen Verschlüsselungs-Algorithmen brechen kann, wurde viel in die Kryptographie-Forschung investiert“, berichtet Marquardt.

Schutz vor solchen Computern sollte die Quantenphysik selbst bieten. Denn nach deren Gesetzen verursacht jeder Lauschangriff eine Zustandsveränderung auf der Leitung, die sich nachweisen lässt. Es ist also nicht möglich, eine Nachricht abzuhören, ohne dass dies bemerkt wird (siehe auch S. 18 f).

So weit die Theorie. Techniken zu entwickeln, die nach diesem Prinzip arbeiten, war jedoch aufwendig. „Dafür müssen quantensensitive Messungen durchgeführt werden“, erklärt Marquardt. „Das ist nicht einfach, da man am Quantenlimit messen muss.“ Um dann die Sicherheit nachzuweisen, sei die Kooperation von Physikern und Informatikern nötig gewesen – auch dies kein einfaches Unterfangen.

Noch bedient die Quantenkryptographie eher einen Nischenmarkt

Doch diese Arbeit ist getan. Und so gibt es schon seit einiger Zeit Unternehmen, die mit Quantenkryptographie ihr Geld verdienen. Dazu zählt zum Beispiel die Schweizer Firma ID Quantique, die vor 15 Jahren von Physikern der Universität Genf gegründet wurde. Sie bietet unter anderem Technologien an, mit denen sich Quantenschlüssel austauschen lassen. Mit deren Hilfe kann dann eine Kommunikation abhörsicher durchgeführt werden. Außerdem im Angebot: ein Quantenzufallszahlengenerator, mit dem sich laut Anbieter absolut zufällige und sichere Schlüssel erstellen lassen.

Wachstumsraten von etwa 30 Prozent kann ID Quantique für die vergangenen Jahre vorweisen. Die Kunden kommen vor allem aus dem Finanzsektor. Das Unternehmen dringt aber auch in andere Felder vor. So kooperiert ID Quantique unter anderem mit Acronis – einem Spezialisten von Sicherheitstechnik für das Cloud Computing. Gemeinsam wollen die Anbieter Firmen vor „zukünftigen Sicherheitsrisiken schützen, die durch die Weiterentwicklung von Entschlüsselungstechniken sowie durch Quantencomputer entstehen werden“, wie es in einer gemeinsamen Erklärung heißt. Die Zusammenarbeit mit dem südkoreanischen Telekommunikationsunternehmen SK Telecom soll Sicherheitschips von Mobilgeräten verbessern.

Auch Technikgrößen wie Toshiba oder NEC beschäftigen sich mit Quantenkryptographie. Aber noch bedienen die Anbieter mit ihren Produkten eher einen Nischenmarkt. „Quantenkryptographie ist noch nicht so weit, dass sie jeder in seinem Wohnzimmer nutzen kann“, meint Marquardt. Das sei auch eine Kostenfrage.

Zudem gibt es noch ein technisches Problem. Die Kommunikation per Glasfaserkabel ist im Moment noch auf 100 bis 200 Kilometer begrenzt. Der Grund: Beim Datenaustausch über die Glasfaser entstehen Verluste, die die Quantenzustände stören.

Eine Alternative könnte die Nutzung von Satelliten sein. Ein großer Teil des Weges führt dabei durchs Vakuum, was die Verluste deutlich verringert. „Hier starten ge-

INFORMATION

Empfehlungen der QUTEGA-Initiative

Die nationale Initiative „Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen (QUTEGA)“ empfiehlt in ihrem Grundlagenpapier eine Reihe von Maßnahmen, um Quantentechnologien zu fördern und zur industriellen Anwendung zu bringen. Dazu zählen:

Förderung von Konsortien

In diesen Konsortien können Vertreter aus Wissenschaft und Industrie gemeinsam an der Verwirklichung konkreter marktrelevanter Projekte arbeiten. Auf diese Weise ist eine enge und ergebnisorientierte Abstimmung gewährleistet. Bei Grundlagenthemen werden Konsortien erforderlich sein, an denen sich noch keine Industrie direkt aktiv beteiligt. Die anwendungsnäheren Themen sollten unterschiedliche Grade der Industriebeteiligung erlauben, die den sehr unterschiedlichen Entwicklungsständen in der Quantenforschung Rechnung tragen.

Schaffung von Zentren für Quantentechnologien

Bestehende Forschungsaktivitäten können durch die Förderung von Zentren gebündelt und unterstützt werden. Initiativen für solche Zentren sollten zunächst als industrie- oder anwendungsnahe Konsortien starten, um sich bei entsprechendem Erfolg gegebenenfalls zu Zentren zu entwickeln. Solche Zentren erreichen durch das gemeinsame Auftreten der beteiligten Forschergruppen leichter die Industrie. Dies verbessert nicht nur die Berufsaussichten der Absolventen, sondern erleichtert auch die Annahme der Technologie durch die Industrie.

Sabbaticals für Fachkräfte

Ein flexibler, befristeter Austausch von Fachkräften aus Industrie und Forschung führt zu einer signifikanten Verbesserung des Kompetenzaustauschs. Sabbaticals fördern Durchlässigkeit, die in beide Richtungen genutzt werden kann. Industrievertreter können zeitlich begrenzt in Forschungseinrichtungen wechseln und Wissenschaftler in Industrieunternehmen.

Ausbildung

Quantentechnologien werden derzeit in der schulischen und in der fächerübergreifenden universitären Ausbildung nur unzureichend behandelt. Die Ingenieure in den relevanten Industrien sind bisher mit Quantentechnologien nur sehr wenig vertraut. Um die industrielle Anwendung zu fördern, sollen die Quantentechnologien in Zukunft verstärkt in die universitäre Ausbildung von Ingenieuren Eingang finden.

KRISTALLINE SPIEGELTECHNIK

»Man wird unserer Technologie auch im Alltag begegnen«

Das Unternehmen CMS stellt Spiegel mit einer kristallinen Schicht aus Halbleitern her – ursprünglich entwickelt, um Quanteneffekte nachzuweisen. Im Interview erklärt Geschäftsführer Christian Pawlu konkrete Anwendungsmöglichkeiten der Technik und die weiteren Pläne der Firma.



CHRISTIAN PAWLU, Geschäftsführer von Crystalline Mirror Solutions (CMS)

An welchen Produkten und konkreten Anwendungen arbeitet CMS zurzeit?

Die kristallinen Superspiegel von CMS beinhalten eine Technologie, die viele Anwendungen ermöglicht. Zunächst waren die meisten unserer Kunden Universitäten aus der ganzen Welt, die unsere

Spiegel für Präzisionsinterferometrie und Spektroskopie nutzen. Das LIGO-Observatorium arbeitet mit uns an der nächsten Generation von Gravitationswellenmessungen und das Forschungsinstitut JILA/NIST in Boulder baut mit Technologie von CMS die genaueste Atomuhr. Nach und nach kamen immer mehr Industriekunden hinzu, die mit unseren Spiegeln beispielsweise Lösungen für das Wärmemanagement von Hochleistungslasern und Lösungen für Probleme in der Luftfahrt gefunden haben. In Kooperation mit der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft und der Universität Wien wollen wir unsere Anwendungen im mittleren Infrarot-Bereich ausbauen.

Lassen sich Produkte schon im Alltag einsetzen?

Unserer Technologie werden künftig vermutlich auch Privatpersonen im Alltag begegnen, ohne es zu wissen. Wir werden zum Beispiel davon profitieren können, wenn Flugzeuge Navigationssysteme besitzen, die auf den Zentimeter genau messen, oder wenn wir Krankheitserreger oder andere Moleküle

in der Luft feststellen können. Ein großer Fortschritt wurde bereits in der Oktoberausgabe des Magazins „Science“ publiziert. Darin geht es um die Aufdeckung eines Zwischenprodukts der Kohlenmonoxid-Verbrennung mittels unserer Technologie. Dies kann uns helfen, Verbrennungsprozesse nicht nur besser zu verstehen, sondern diese auch besser zu kontrollieren und gegebenenfalls besser auf unsere Umwelt abzustimmen.

Wie geht die Entwicklung bei CMS weiter?

CMS wurde 2013 gegründet. Wir haben inzwischen mehrere Produktions- und Entwicklungsstandorte in Österreich, den USA und der Schweiz. Nun steht die Weiterentwicklung unserer Produkte im Vordergrund. Viele Investitionen sind sehr kostenintensiv mit manchmal unsicheren Ergebnissen. Die Einschätzung des Risikos und der Mut, dieses Risiko einzugehen, sind unternehmerische Herausforderungen, die uns in der Vergangenheit beschäftigt haben, aber auch zukünftig Herausforderungen bleiben werden.

rade europaweit viele Programme, die sich damit beschäftigen“, berichtet Marquardt.

Ein weiteres, inzwischen weit vorgeschrittenes Einsatzfeld der Quantentechnologie ist die Entwicklung von Sensoren. Dazu zählt beispielsweise das Laserinterferometer, das bereits nah am Quantenlimit arbeitet. Mit seiner Hilfe konnte der Nachweis von Gravitationswellen erbracht werden. Die nächste Generation nutzt laut Marquardt bereits spezielles Quantenlicht. Diese Technik ist in der Nähe von Hannover zu bestaunen. Dort befindet sich mit GEO600 ein entsprechender Gravitationswellendetektor, der vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover und weiteren Universitäten aus Großbritannien und Spanien betrieben wird.

Sensoren haben gerade in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Sie sind elementarer Bestandteil von Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. Da ist es kein Wunder, dass ein Unternehmen wie Bosch zusammen mit der Universität Stuttgart an dem Thema arbeitet. Interessante Einsatzfelder finden sich in der Automobilindustrie ebenso wie in der Medizinbranche. Noch ist man bei Bosch allerdings zurückhaltend, was die Erfolgsaussichten betrifft. „Wir sehen die Quantentechnologie als eine sehr interessante Möglichkeit in der Zukunft“, sagte Forschungschef Michael Bolle vor einigen Monaten im Deutschlandfunk. „Mit großen Chancen, aber auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dass es nicht erfolgreich wird.“

Mögliche Anwendungen liegen auch beim sogenannten Ghost Imaging noch in der Zukunft. Dabei wird eine

der erstaunlichsten Eigenschaften der Quantentechnologie genutzt – die Verschränkung. Miteinander verschränkte Teilchen besitzen identische Quantenzustände. Messungen an den beiden Teilen ergeben das gleiche Ergebnis, selbst wenn diese weit voneinander entfernt sind. Mithilfe miteinander verschränkter Photonenpaare lassen sich so Bilder von einem Objekt machen, obwohl die entsprechende Kamera das eigentliche Licht gar nicht aufnimmt. Heißt konkret: Ein Lichtteilchen wird auf das Objekt gelenkt, das andere auf den Kamerasensor. Da beide miteinander verschränkt sind, nutzt die Kamera das auf sie treffende Photon, um ein Bild von dem Objekt zu machen. Mit dieser Methode könnten zum Beispiel Aufnahmen von sehr empfindlichen biologischen Objekten gemacht werden. Eine weitere Anwendung wäre die Untersuchung von Computerchips.

Während man bei dieser Methode von der industriellen Nutzung noch entfernt ist, kann Crystalline Mirror Solutions (CMS) bereits konkrete Produkte vorweisen (siehe Interview). Das österreichische Unternehmen produziert kristalline Spiegel, die das thermische Rauschen um ein bis zwei Größenordnungen vermindern und „damit ein entscheidendes Problem der lasergestützten Hochpräzisionsmessung lösen“, wie Geschäftsführer Christian Pawlu erklärt. Das Unternehmen sei durch eine Kombination aus dem Know-how der Wiener Quantenoptik mit den Materialwissenschaften des Silicon Valley entstanden. Die beiden Gründer Garrett Cole und Prof. Markus Aspelmeyer forschten an der Universität Wien und suchten gemeinsam nach neuartigen Beschichtungen, die bei der Messung von Quanteneffekten weniger störanfällig als die bis dahin bekannten sein sollten. Die Spiegel kommen unter anderem bei der nächsten Generation der Gravitationsdetektoren zum Einsatz. Laut Pawlu kann die Technologie aber für viele weitere Messaufgaben genutzt werden – wie zum Beispiel in Navigationssystemen. Daneben lassen sich mithilfe der Spiegel die chemischen Prozesse bei der Verbrennung von Kohlenmonoxid besser analysieren. Die Messung sei damit um den Faktor 10 genauer als bei herkömmlich beschichteten Spiegeln. „Genaue Messungen sind die Basis für bessere Modelle zur Entstehung von Luftverschmutzung, effizientere Verbrennungsprozesse und von atmosphärisch-chemischen Reaktionen, die relevant für die Treibhausgasproduktion und den Klimawandel sind“, erklärt Pawlu.

Von der Grundlagenforschung zu konkreten Anwendungen in der Praxis

Die beiden Gründer weisen gerne darauf hin, dass das Unternehmen aus der Grundlagenforschung geboren ist. „CMS ist ein Paradebeispiel für die Entstehung von Innovationen durch Grundlagenforschung mit Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie“, so Pawlu. Besonders wichtig sind seiner Meinung nach Kooperationen mit anderen Unternehmen und Institutionen. „Als kleines Unternehmen sind wir darauf angewiesen, Netzwerke zu bilden“, so der Geschäftsführer. „Wir haben Forschungs- und Entwicklungskollaborationen mit namhaften europäi-

schen und amerikanischen Firmen und diese Kollaborationen sind Teil unseres Geschäftsmodells.“

Den Weg aus den Forschungslabors zu finden, ist in Deutschland aber nach wie vor ein Problem. „Wir machen hierzulande eine tolle Grundlagenforschung“, sagt Marquardt. „Aber dann werden die Ergebnisse veröffentlicht, zur Seite gelegt und das Produkt entwickelt jemand anderes.“ Ebenso wie die mit einer Milliarde ausgestattete Flaggschiff-Initiative zur Quantenphysik der Europäischen Kommission soll die nationale QUTEGA-Initiative des Bundesforschungsministeriums dies ändern. „QUTEGA will Wissenschaftler dazu ermutigen, schon frühzeitig mit Unternehmen oder Instituten, die diese Technik bereits anwenden, zusammenzuarbeiten“, sagt Marquardt. Es wäre sehr hilfreich, wenn Grundlagenforscher und Industrie miteinander reden würden. „So erhält man als Forscher das Feedback, was gebraucht wird und wie man das zu einem Produkt macht.“ Umgekehrt erfahren die Firmen, was mithilfe der Quantenphysik möglich ist.

Ingenieure sollten Basiskenntnisse der Quantentechnologie haben

Als Beispiel könnte die Firma ID Quantique dienen. Zwischen ihr und der Universität Genf gibt es einen regen Austausch. Die Hochschule hält auch Anteile an ID Quantique. Sie kümmert sich um die Grundlagenforschung, während das Unternehmen die konkreten Produkte entwickelt und sich um deren Vermarktung kümmert. In einer gemeinsamen Stellungnahme zu den Perspektiven der Quantentechnologie benennen auch die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Defizite bei der wirtschaftlichen Nutzung der Quantenphysik in Deutschland. Ein Problem ist demnach die bestehende Forschungs- und Förderstruktur. „Aufgrund des interdisziplinären Charakters ist die Förderung zu den einzelnen Aspekten der Quantentechnologien weit über die unterschiedlichen Fachgebiete verstreut. Entsprechend sind auch die Kompetenzen an verschiedenen Orten angesiedelt und werden daher von der Industrie nicht wahrgenommen“, heißt es in dem Papier. Am Ende sprechen die Experten noch eine klare Empfehlung zur inhaltlichen Ergänzung der Ausbildung von Ingenieuren aus: „Bereits in der Grundausbildung sollte das Grundwissen über Quantenphänomene vermittelt werden – und zwar mit derselben Selbstverständlichkeit, mit der etwa das Wissen der Mechanik vermittelt wird.“ Es geht immerhin darum, international nicht den Anschluss bei dieser zukunftsreichen Technologie zu verlieren.

MARKUS STREHLITZ

schreibt als freier Journalist hauptsächlich über Informationstechnologie.