

Wolfgang Pauli Niels Bohr Paul Dirac
Max Planck Richard Feynman Louis
de Broglie Norman Ramsey Willis
Lamb Otto Stern Werner Heisenberg
Walther Gerlach Ernest Rutherford
Satyendranath Bose Max Born Erwin
Schrödinger Eugene Wigner Arnold
Sommerfeld Julian Schwinger David
Bohm Enrico Fermi Albert Einstein

Wo Entdecker auf Praktiker treffen



INTEGRATED QUANTUM
SCIENCE AND TECHNOLOGY



Albert Einstein und Niels Bohr 1930. Foto: Paul Ehrenfest

„Aber zu einem Verzicht auf die strenge Kausalität möchte ich mich nicht treiben lassen, bevor man sich nicht ganz anders dagegen gewehrt hat als bisher. Der Gedanke, dass ein einem Strahl ausgesetztes Elektron aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, so möchte ich lieber Schuster oder Angestellter in einer Spielbank sein als Physiker.“

„Ich kann nicht glauben, dass der Mond am Himmel ist, nur weil eine Maus darauf schaut.“

Diese beiden Zitate von Albert Einstein drücken nicht nur seine bekannte Abneigung gegen die Quantentheorie aus, sondern stammen auch aus zwei ganz unterschiedlichen Perioden seines Lebens. Das erste ist aus einem Brief vom 19. April 1924 an Max Born zu dessen statistischer Interpretation der Quantenmechanik. Das zweite ist aus der letzten Vorlesung von Einstein im Rahmen eines Seminars des amerikanischen Physikers John Archibald Wheeler im Jahr 1954 in Princeton.

Zu der Erkenntnis, dass in der Quantenwelt Objekte nur existieren, wenn sie gemessen werden – und dies verbirgt sich hinter der Mond-Maus-Analogie, war Einstein im Rahmen einer gemeinsamen Arbeit mit Nathan Rosen und Boris Podolski im Jahr 1935 gelangt. Diese hatte zwar ursprünglich die Absicht zu zeigen, dass die Quantenmechanik unvollständig ist, heute wissen wir aber insbesondere aufgrund einer Veröffentlichung von John Bell aus dem Jahr 1964, dass sich hier ein Charakteristikum der Quantenmechanik manifestiert. Es existieren in der Quantenwelt Korrelationen, die es klassisch nicht gibt.

Lange Zeit galten diese Quantenkorrelationen, die dann auftreten, wenn man die Wechselwirkung zwischen mehreren Quantenobjekten betrachtet, als Kuriositäten der Theorie. Heute können wir diese aber als Ressourcen einsetzen, um z.B. Nachrichtenübertragung

sicherer zu machen, neue Arten von Computern zu entwickeln oder hochgenaue Messgeräte zu konstruieren.

Auf diese Weise strahlt die Quantentheorie über das Gebiet der Physik in andere Bereiche hinein, wie z.B. die Mathematik, die Ingenieurwissenschaften, die Chemie und sogar die Biologie. Einige wenige Beispiele mögen dies illustrieren. Das Gebiet der Kryptografie benutzt die Zahlentheorie, die ein Teilgebiet der reinen Mathematik darstellt. Die Realisierung eines Quantencomputers mit neuartigen Gattern auf der Grundlage des Überlagerungsprinzips der Quantenmechanik erfordert die Einbindung der Ingenieurwissenschaften. Moleküle und Festkörpersysteme für Quanteninformationsverarbeitung maßzuschneidern ist eine moderne Aufgabe für Chemiker. Seit Kurzem ist sogar in der Biologie im Zusammenhang mit Photosynthese die Relevanz der Quantenmechanik für diesen Prozess ein Forschungsthema. Die einzelnen Teildisziplinen der Naturwissenschaften können diese Fragen nicht mehr lösen. Ein gemeinsamer, integrierter Zugang ist notwendig. So hat sich in den letzten Jahren eine eigene interdisziplinäre Wissenschaft, die sich unter dem Schlagwort Quantenwissenschaft (Quantum Science) zusammenfassen lässt, entwickelt. Die beiden Universitäten Ulm und Stuttgart zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung (MPI FKF) haben diese Entwicklung aufgegriffen und ein interdisziplinäres und über die

Grenzen der Institutionen und Standorte hinausreichendes Zentrum gegründet, das sich diesen Fragestellungen widmet. Das Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST) wird von den beiden Universitäten Ulm und Stuttgart sowie dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg (MWK BW) gefördert. Dafür danken wir recht herzlich. Unser Dank gilt insbesondere Dr. Renate Fischer und Dr. Heribert Knorr vom MWK BW, die uns bei der Gründung des IQST enorm unterstützt haben.

Ulm und Stuttgart, im November 2015
Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich
Institut für Quantenphysik,
IQST Vorstand, Universität Ulm



Im Zentrum der Universität Stuttgart stehen die Ingenieur- und Naturwissenschaften mit erfolgreichen Forschungstraditionen. Seit einigen Jahren ist die Quantentechnologie zentraler Forschungsschwerpunkt in Stuttgart. Unsere Stärke ist die Kombination von exzellenter Grundlagenforschung in der Physik, die neue quantenphysikalische Prinzipien erschließt, und das Know-how aus den Ingenieurwissenschaften, um daraus Zukunftstechnologien zu entwickeln. In einer preisgekrönten Mannschaft von Wissenschaftlern und dem 2015 von Bund und Land bewilligten Zentrum für Angewandte Quantentechnologien ZAQuant spiegelt sich diese strategische Ausrichtung bereits wider.

Für Studierende eröffnen sich mit der interdisziplinären Zusammenarbeit neue Perspektiven und die Quanteningenieurin und der Quanteningenieur könnten bald Wirklichkeit werden.

IQST bietet die Chance, die führende Rolle in den Quantentechnologien weiter auszubauen und damit auch den Industriestandort Baden-Württemberg zu stärken.

Universität Stuttgart, im November 2015
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel
Rektor der Universität Stuttgart



Im IQST arbeiten eine Reihe höchst renommierter Wissenschaftler der Universitäten Stuttgart und Ulm sowie des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung Stuttgart an der Erforschung neuartiger Quantenphänomene. Ziel ist es, bislang Unerkanntes zu entdecken, die zugrunde liegenden Mechanismen zu verstehen, um sie anschließend in Anwendungen nutzbringend für die Gesellschaft umzusetzen. Die bislang im Verbund schon erzielten Ergebnisse zu optischen Modulatoren, magnetischen Sensoren, energetischen Effekten in Biosystemen und vielem mehr sind außerordentlich beeindruckend und eröffnen Neuland für attraktive künftige Forschungsfelder. Sie liefern darüber hinaus Ansätze zur Anwendung der Erkenntnisse beispielsweise für sichere Datenverschlüsselungstechniken, zur Analyse komplexer epigenomischer Prozesse in lebenden Zellen oder zum zielgerichteten molekularen Design innovativer Funktionswerkstoffe.

Die Universität Ulm wird IQST nach Kräften unterstützen und alles tun, damit der Verbund seine führende interdisziplinäre Stellung der Quantenforschung auch in Zukunft behaupten kann.

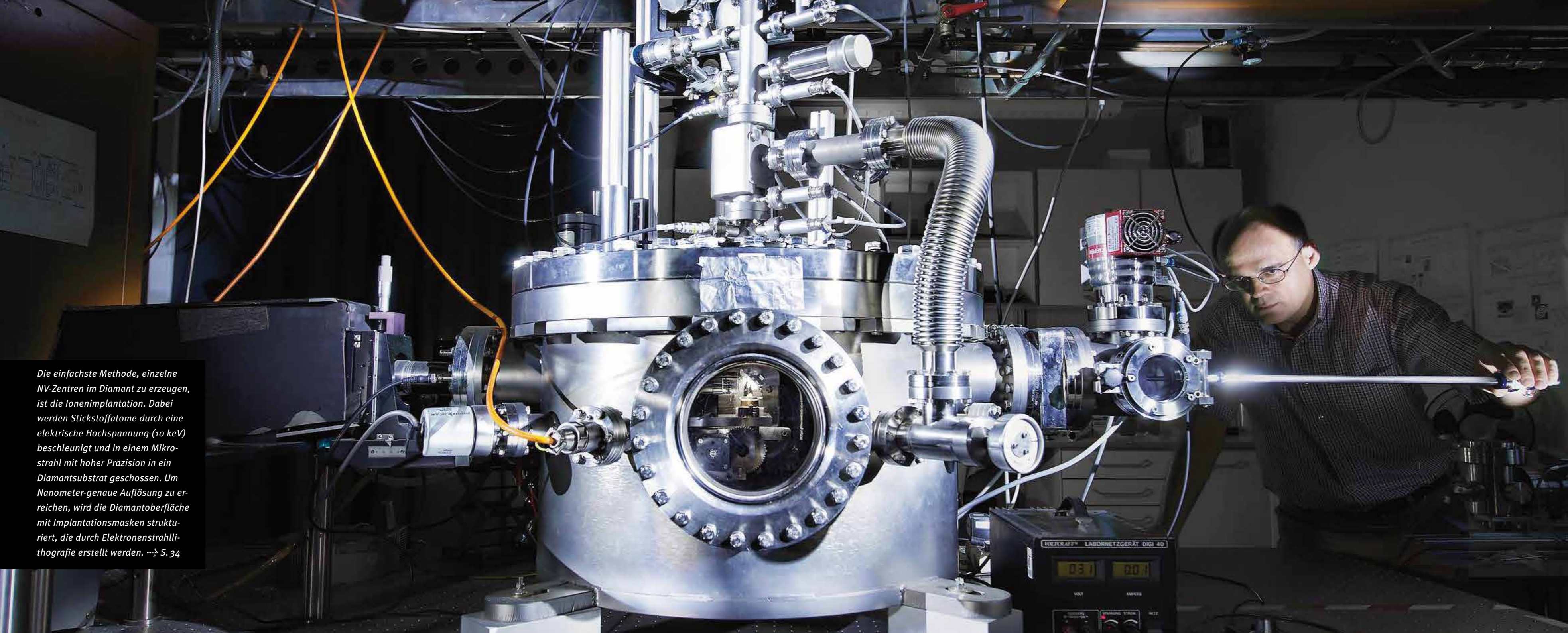
Universität Ulm, im November 2015
Prof. Dr.-Ing. Michael Weber
Präsident der Universität Ulm



Kollektive Quantenphänomene in komplexen und nanostrukturierten Materialien sind zentrale Forschungsgegenstände am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. Im IQST wird die Synergie zwischen der Materialforschung und der Quantentechnologie auf verschiedenen Ebenen wesentlich gestärkt. Einerseits ist etwa die gezielte Synthese und Modifikation komplexer elektronischer Materialien ein bislang noch weitgehend unerschlossener Forschungsansatz in der Quantentechnologie. Andererseits eröffnen auf einzelnen Quantensystemen basierende Sensoren neue Forschungsperspektiven für das Verständnis physikalischer Eigenschaften von Festkörpern auf der Nanometer-Längenskala. Gemeinsam mit unseren Kollegen an den Universitäten Stuttgart und Ulm erkunden und nutzen wir dieses Potenzial und freuen uns darauf, diese fruchtbare Zusammenarbeit in Zukunft noch weiter zu intensivieren.

Stuttgart, im November 2015
Prof. Dr. Bernhard Keimer
Direktor, MPI für Festkörperforschung





Die einfachste Methode, einzelne NV-Zentren im Diamant zu erzeugen, ist die Ionenimplantation. Dabei werden Stickstoffatome durch eine elektrische Hochspannung (10 keV) beschleunigt und in einem Mikrostrahl mit hoher Präzision in ein Diamantsubstrat geschossen. Um Nanometer-genaue Auflösung zu erreichen, wird die Diamantoberfläche mit Implantationsmasken strukturiert, die durch Elektronenstrahlithografie erstellt werden. → S. 34

- Zentrum für Quantenwissenschaft und -technologie IQST in Baden-Württemberg1
- Vorworte3
- Wo Entdecker auf Praktiker treffen9
- Mit Quantenphysik den globalen Herausforderungen begegnen 10
 - Miniaturisierung 10
 - Datensicherheit..... 12
 - Energie 12
 - Revolution des Messwesens..... 14
- Das IQST als Leuchtturm dieser Entwicklungen 17
- Arbeitsgebiete des IQST 19
 - Rydberg-Atome: Tausendsassa der Quantentechnik 19
 - Quantentechnik aus dem Baukasten der Chemie 28
 - Verschränkte Photonen erschnuppern Einzelmoleküle 32
 - Diamanten im Herzen des Quantencomputers 34
 - Schmieröl für Quantencomputer 39
 - Das Ballett der Atome..... 42
 - Kontrolle über einen Ozean von Elektronen 44
- Das IQST in Zahlen 46
- Zukünftige Entwicklungen im IQST 47
- IQST weltweit vernetzt 48
- IQST-Köpfe 50
- Glossar 54
- Impressum 58

Am Zentrum für Quantenwissenschaft und -technologie in Baden-Württemberg entstehen aus abstrakter Quantenphysik neue technologische Ansätze. *Text: Dr. Christian J. Meier, Darmstadt*

Klimawandel, Überalterung der Gesellschaft, schwindende Datensicherheit: Nur mit neuen Technologien lassen sich die größten Herausforderungen der Menschheit lösen. Kann dazu auch die Quantenphysik beitragen? Jene Wissenschaft also, deren Effekte gerne mit „seltsam“, „bizarr“ oder „spukhaft“ beschrieben werden? Die überraschende Antwort: unbedingt.

Denn zum einen führt die fortschreitende Miniaturisierung von Technologie zwangsläufig in die Welt der kleinsten Teilchen, wo die Gesetze der Quantenphysik regieren. Sie zu beherrschen ist also unerlässlich. Die Quantenphysik birgt zudem enormes technologisches Potenzial: extrem schnelle und energiesparende Rechner, abhörsicheren Datentransfer, höchstgenaue Sensoren oder äußerst verlustarme Energietechnik.

Um jedoch die Hürden zu einer Quantentechnik zu überwinden ist eine interdisziplinäre Anstrengung in der Grundlagenforschung nötig. Damit exzellente Forschungsergebnisse den Sprung in die Anwendung schaffen, braucht es darüber hinaus Ingenieure, die eng mit Quantenwissenschaftlern zusammenarbeiten.

Beides leistet das Center für Integrierte Quantenwissenschaft und -technologie (IQST) an den Universitäten Stuttgart und Ulm und am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Entdecker treffen am IQST auf Praktiker. Physiker, Chemiker, Biologen oder

Mathematiker erforschen die Welt der Quanten in ihrer ganzen Breite und arbeiten dabei zum Teil Hand in Hand mit Ingenieuren zusammen oder kooperieren direkt mit der Industrie.

Als einzigartiger Zusammenschluss seiner Art in Deutschland bringt das IQST die kritische Masse mit, um international als Kompetenzzentrum für Quantenwissenschaft und -technologie wahrgenommen zu werden.



Stuttgart



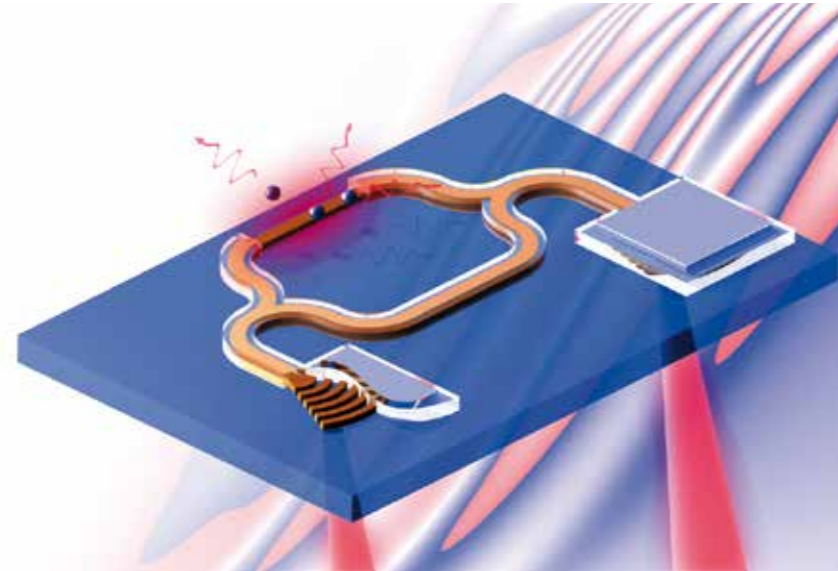
Ulm

Mit Quantenphysik den globalen Herausforderungen begegnen

Weiter steigende Leistungsfähigkeit von Computern, Datensicherheit in Zeiten lückenloser digitaler Überwachung und Anschub für regenerative Energiequellen: Quantentechnik ist eine Schlüsseltechnik einer zunehmend schwierig zu meisternden Zukunft.

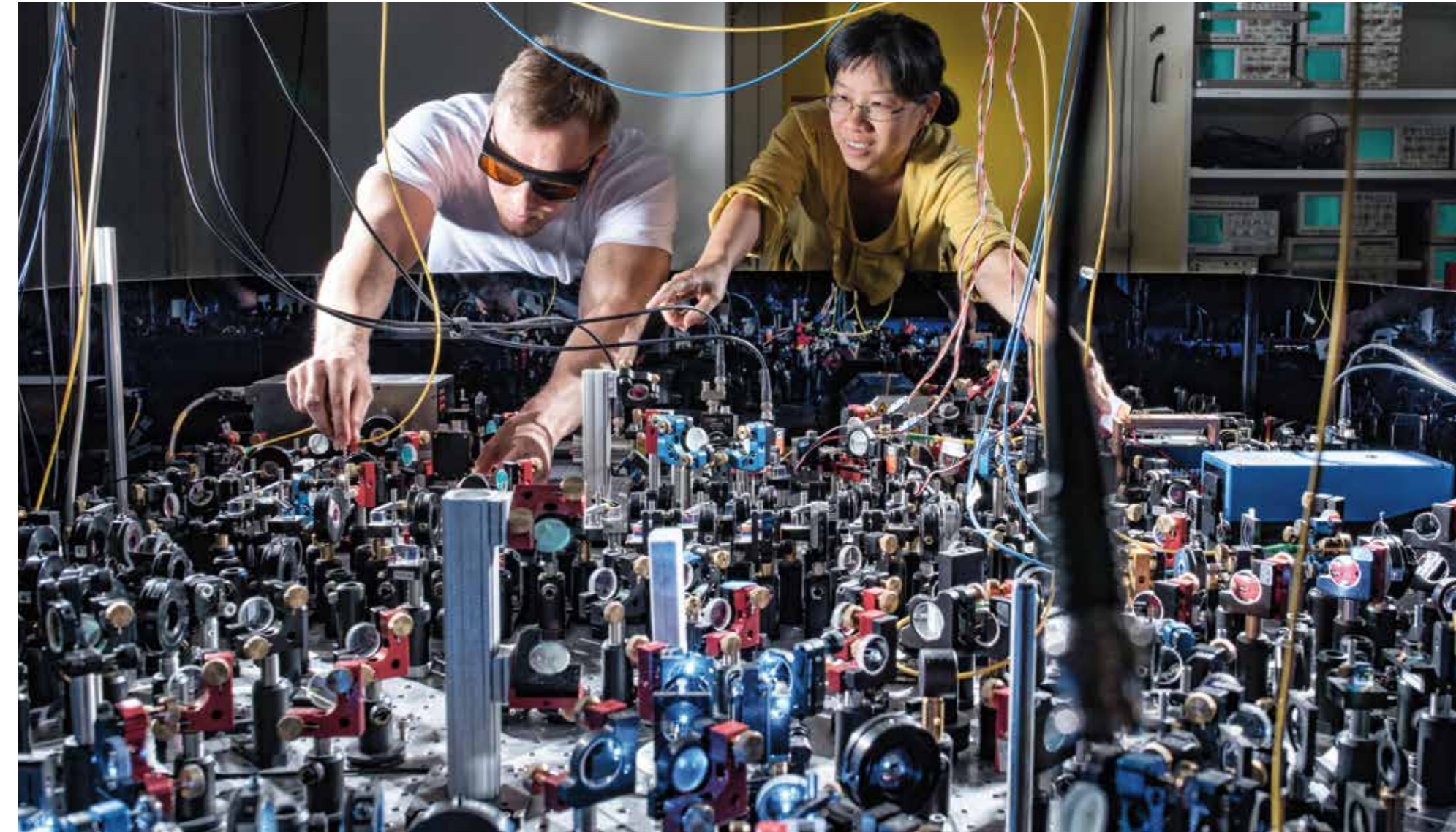
Miniaturisierung

Ohne immer weiter schrumpfende Elektronik hätte es sicher keine digitale Revolution gegeben. Gemessen an den Standards der 1960er-Jahre steckt heute in jedem Smartphone ein Supercomputer. Seit dieser Zeit verdoppelt sich die Anzahl der elektronischen Bauteile auf Computerchips alle zwei Jahre. Heute passen auf einen fingernagelgroßen Chip Milliarden von so genannten Transistoren, also winzigen elektronischen Schaltern, die zusammen logische Schaltkreise bilden. Doch das Schrumpfen wird maximal noch zehn Jahre weitergehen, schätzen Experten. Dann wird die derzeitige Siliziumtechnologie an ihre Leistungsgrenzen stoßen. Quantenphysiker gehen in ihren Labors schon heute über die Grenzen der mit der Siliziumtechnologie möglichen Miniaturisierung hinaus. Sie kontrollieren einzelne Atome, Elektronen oder Lichtteilchen. Kleiner geht es nicht. Mit diesen natürlichen Grundbausteinen der Materie lassen sich die Funktionen von elektronischen Bauteilen nachempfinden, weshalb die Miniaturisierung der Digitaltechnik mit ihnen weitergehen könnte. Das Ziel ist es, ein Bit durch ein einziges Atom darzustellen und in der Datenübertragung ein Bit mit einem einzigen Photon zu transportieren. Zudem kann die Leistungsfähigkeit von Computern noch erheblich über das heutige Maß hinaus gesteigert werden, wenn man die Quanteneigenschaften von Teilchen gezielt für Rechenprozesse nutzbar macht – Stichwort: Quantencomputer.



Ein erster Prototyp eines integrierten Mach-Zehnder-Interferometers wurde vom 5. Physikalischen Institut erstmals realisiert.

Das Bild rechts zeigt den Aufbau für Atomspektroskopie von atomaren Gasen bei Raumtemperatur. Die Kunst ist bei diesen vergleichsweise hohen Temperaturen Quanteneffekte herauszuarbeiten und nutzbar zu machen. Um dies präzise durchführen zu können, sind unzählige optische Komponenten im Einsatz. In Zukunft soll das ganze Atomspektroskopielabor auf einen Chip passen; das heißt alle optischen Komponenten, die Laserquelle und Lichtdetektoren und die zu spektroskopierenden Atome.



Datensicherheit

Die NSA-Spähaffäre hat die Sensibilität für IT-Sicherheit und Datenschutz deutlich erhöht. Der Mann auf der Straße fragt sich genauso wie die Chefetagen, wie sicher Daten in der Cloud noch sind. Zudem wachsen die Anforderungen an Verschlüsselungsverfahren umso stärker, je mehr sensible Daten digitalisiert werden. Gesundheitsdossiers, Grundbucheinträge oder vertrauliche Kommunikation: All das soll nicht nur bis morgen, sondern für Jahrzehnte sicher verschlüsselt werden können.

Die Quantenphysik kann hierbei Schwächen klassischer Verschlüsselungsverfahren überwinden. Die Sicherheit heutiger Verfahren basiert auf extrem schwierigen mathematischen Problemen, die auch ein leistungsfähiger Computer nur in Jahrmilliarden knacken kann. Was heute noch eine harte Nuss ist, kann jedoch für einen Rechner in 20 Jahren eine relativ leichte Übung sein. Die Verschlüsselung hat also ein Verfallsdatum. Die so genannte Quantenkryptografie hingegen garantiert Sicherheit auf Basis von Naturgesetzen. Und die gelten auch noch in 100 oder 1.000 Jahren. Weil sich einzelne Lichtteilchen nicht in all ihren Eigenschaften kopieren lassen, kann eine mit diesen Quantenobjekten verschlüsselte Botschaft nicht abgefangen werden, ohne dass es Sender und Empfänger mitbekommen. Der Lauscher wird also zwangsläufig bemerkt.

Auch mit Quantencomputern lassen sich Daten schützen. Auf der einen Seite können künftige Quantencomputer mithilfe der Gesetze der Quantenphysik heute gängige Verschlüsselungs- und digitale Signaturverfahren knacken. Denn diese basieren darauf, dass sich 300-stellige Zahlen nur sehr schwer in Primzahlen zerlegen lassen, also Zahlen, die nur durch sich selbst und durch 1 teilbar sind. Doch gerade diese Übung kann ein ausreichend leistungsfähiger Quantencomputer im Handumdrehen lösen. Die Quantenphysik ermöglicht aber theoretisch auch Server, auf denen ein Kunde Rechenarbeiten ausführen kann, ohne dass der Cloud-Dienstleister die Eingabe- oder Ausgabedaten abzweigen kann.

Energie

Quantencomputer werden eine Fülle neuer Möglichkeiten mit sich bringen. Sie werden Probleme lösen können, vor denen heute selbst die größten Supercomputer die Waffen strecken müssen. Dazu gehört die Simulation extrem komplexer Probleme in der Materialentwicklung. Einer dieser hochkomplexen Werkstoffe könnte den Energiebedarf der Zivilisation enorm senken und zugleich die breite Nutzung regenerativer Energiequellen vorantreiben: der Hochtemperatur-Supraleiter. Beim Transport und der Speicherung von elektrischer Energie geht

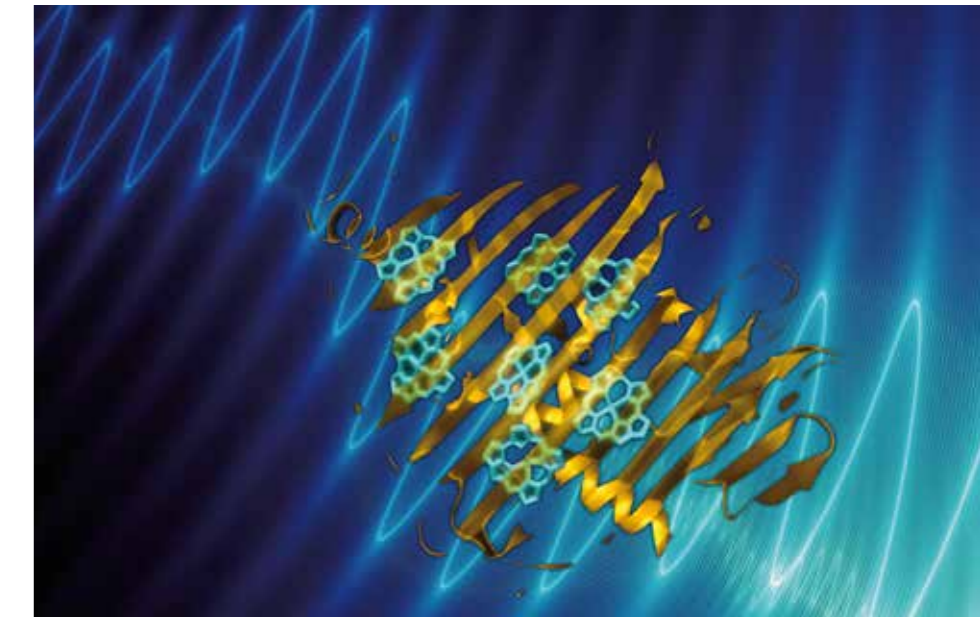
ein großer Teil derselben unwiederbringlich verloren. Anders als herkömmliche Kabel besitzen Supraleiter keinen elektrischen Widerstand. In einigen Städten nutzt man sie bereits, um Strom an Haushalte zu verteilen. Doch die Kabel müssen auf rund -200 °C abgekühlt werden, bei Temperaturen darüber verlieren sie ihre supraleitende Funktion. Das Ziel von Physikern ist es, Supraleiter zu entwickeln, die bei Raumtemperatur verlustfrei leiten. Das würde einen breiten Einsatz der Technik ermöglichen.

Neben einem verlustärmeren Stromnetz würde das den Bau von Magnetschwebbahnen attraktiver machen, da diese dann weniger Energie für die Kühlung der Magnete verbrauchen. Sogar Elektroantriebe für Schiffe, deren Dieselmotoren heute bedeutende CO_2 -Emitenten darstellen, sind mit Hochtemperatur-Supraleitern möglich. Raumtemperatur-Supraleiter würden auch sie attraktiver machen.

Auch die regenerativen Energien könnten von Raumtemperatur-Supraleitern profitieren, und zwar durch neuartige Energiespeicher. Supraleitende Spulen lassen Strom ohne Verluste für lange Zeit in sich kreisen. Elektrische Energie wird dabei in einem Magnetfeld gespeichert. Supraleitende Batterien sind sehr effizient und lassen sich sehr schnell laden und entladen.

Dem großen Nutzen stehen große Hürden im Weg, denn die Hochtemperatur-Supraleitung ist ein äußerst komplexes Phänomen, das

Ein fotosynthetischer Komplex, der aus sieben Licht absorbierenden Chromophoren besteht, wird mit ultraschnellen Laserpulsen untersucht. Dies zeigt die Wechselwirkung von Quanten kohärenter Dynamik und Schwingungsbewegung des umgebenden Proteins, das entscheidend für die optimale Funktion des Komplexes ist.



Physiker noch nicht verstehen. Mit Hilfe von Quantencomputern lassen sich Festkörper Atom für Atom simulieren, sodass ein mikroskopisches Verständnis möglich wird. Auf diesem kann die geplante Synthese von Raumtemperatur-Supraleitern aufsetzen. Auch für effizientere Solarzellen könnten Effekte der Quantenphysik genutzt werden. Es gibt klare Hinweise, dass Pflanzen bei der Fotosynthese bestimmte Quanteneffekte nutzen, um damit eine

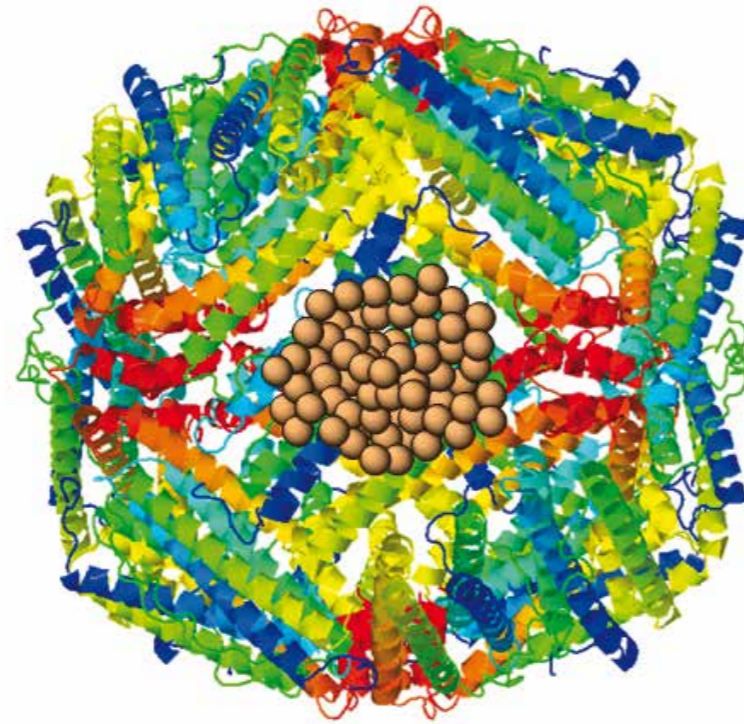
außerordentlich hohe Effizienz zu erreichen. Derzeit erforschen Physiker des IQST diese Thematik. Die Erkenntnisse könnten genutzt werden, um Solarzellen mit deutlich höherer Effizienz herzustellen, als heute möglich.

Revolution des Messwesens

Einzelne Atome, Ionen oder Lichtteilchen sind ideale Sensoren. Denn zum einen sind sie von Natur aus identisch, müssen also nicht geeicht werden. Zum anderen reagieren sie äußerst sensitiv auf physikalische Reize, seien dies Magnetfelder, elektrische Felder, winzigste Schwerkraftänderungen, kleinste Variationen in der Schwerkraft oder Kontakt mit einzelnen Teilchen. Daher erreichen sie als Sensoren extreme Präzision.

Die geschickte Kontrolle ihrer Quanteneigenschaften erlaubt sogar noch mehr: In der konventionellen Technologie gibt es immer einen Rest von Rauschen, der sich nicht unterdrücken lässt. Mit Hilfe der Quantentechnik ist aber genau das möglich. Das Ergebnis ist fast perfekte Präzision. Die Genauigkeit heutiger Sensoren könnte mit Quantentechnik um Größenordnungen übertroffen werden.

Bedarf an miniaturisierten Sensoren hoher Genauigkeit gibt es z. B. in der medizinischen Forschung, in der Umweltsensorik, in der Erd erkundung oder der Raumfahrt.

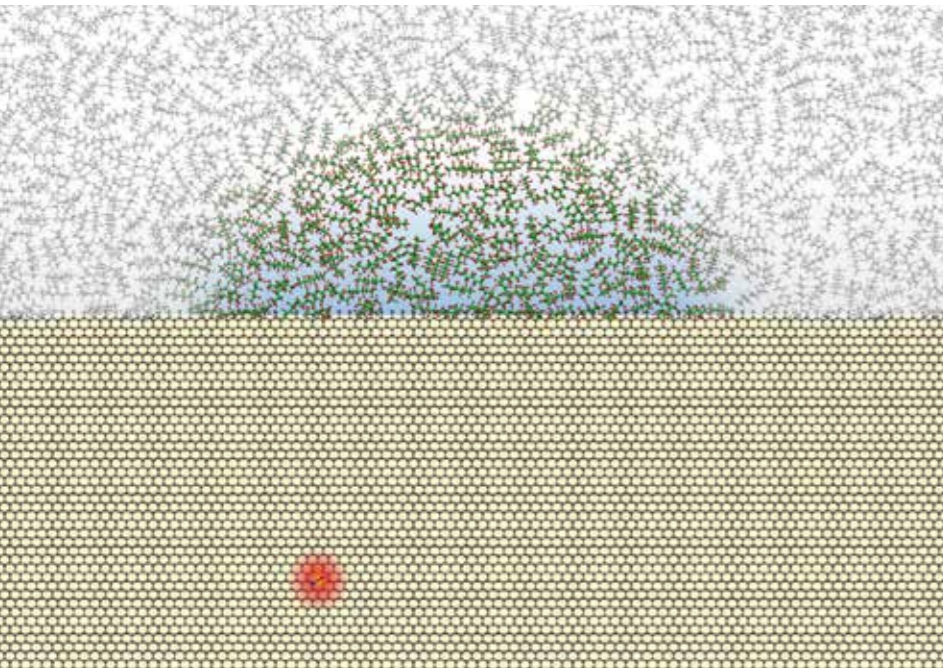


Ferritin ist ein Proteinkomplex, der im Körper als Eisenspeicher dient. Jedes Ferritin-Molekül kann bis zu 4.500 Eisenionen (Spins) je Molekül binden. Winzige Diamant-Sensoren können die von den Ferritin-Proteinen ausgehenden, sehr schwachen Magnetfelder messen. So lässt sich der Eisengehalt im Blut unmittelbar bestimmen.

Die IQST-Forscher Fedor Jelezko (Uni Ulm) und Jörg Wrachtrup (Uni Stuttgart) haben ein erstes kommerzielles „Diamond Quantendevise“ entwickelt, mit dem sich magnetische und elektrische Felder im Nanobereich besonders genau messen lassen. Vorteil: Der neue Sensor arbeitet auch bei Raumtemperatur präzise, ist extrem klein und erlaubt bei hoher Empfindlichkeit und Ortsauflösung ungeahnte Einsichten in die Nanowelt.



Die Quantenphysik wird für Technologie und andere Wissenschaftsfelder immer relevanter. Oft fehlen jedoch die Institutionen, die die unterschiedlichen Welten miteinander verschmelzen. Das IQST ist ein in Deutschland einzigartiger Versuch, diese Schnittmenge herzustellen.



Winzige Magnetfeldsensoren würden die genaue Untersuchung der Vorgänge im Körper erlauben. So wäre ein umfassendes Bild von der Funktionsweise des Gehirns und das Verständnis von Krankheiten wie Alzheimer oder Parkinson möglich. Sensoren, die dank verschränkter Photonen einzelne Moleküle nachweisen, erlauben prinzipiell eine miniaturisierte Diagnostik, z. B. in Form von Analyselaboren in Chipgröße (Lab-on-a-Chip). Auch für die Umweltanalytik, etwa zum Nachweis von Nanopartikeln, wären solche chemischen Sensoren sehr attraktiv.

Höchst präzise Erdbeschleunigungssensoren wiederum könnten Fernerkundungen stark erleichtern, indem sie Öl- oder Wasserreservoirs oder unterirdische Gesteinsschichten ausfindig machen.

Auf Basis der Heisenbergschen Unschärferelation können Frequenzmessungen beschleunigt werden, was die Signalverarbeitung effizienter machen könnte. Auch höchstpräzise miniaturisierte Atomuhren sind durch Quantentechnologie möglich. Diese erlauben im Prinzip Navigationssysteme, welche die Position auf Millimeter genau bestimmen, was z. B. bei autonomen Autos zum Einsatz kommen könnte.

Schließlich werden in der Forschung Quantensensoren zur Messung von Gravitationswellen oder zur Prüfung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie benutzt.

Quantenphysik ist keine eng begrenzte Disziplin, sondern beeinflusst weite Teile der Naturwissenschaften und in Zukunft auch der Technologie. Ob sich Physiker mit Atomen, mit Lasern, Festkörpern, Nanomaterialien oder mit Messtechnik beschäftigen: Immer spielen die Gesetze der Quantenphysik eine Hauptrolle. Aber auch für Chemiker oder Biologen wird die Welt der Quanten immer wichtiger. So häufen sich die Belege, dass die Photosynthese ihre Effizienz der Quantenkohärenz verdankt. Weitere Lebensprozesse, die vermutlich auf Quanteneffekten basieren, sind der Geruchssinn oder der Magnetfeldsinn zur Orientierung bei Vögeln. Damit erschließen sich der Biologie gänzlich neuartige Funktionsprinzipien, mit denen sich biologische Systeme bis hin zu Zellrezeptoren, das Ziel der meisten modernen Medikamente, besser verstehen lassen.

Nicht zuletzt interessieren sich Techniker vermehrt für Quantenphysik. Glasfaserkabel zum Beispiel benutzen immer weniger Photonen für den Transport eines Bits. Je mehr sich die Nachrichtentechnik dem Ziel nähert, ein Bit auf nur einem einzigen Photon zu transportieren, desto weniger Bits dürfen beim Transfer verloren gehen. Dies ähnelt den Anforderungen, die Quantenphysiker heute schon in ihren Experimenten mit einzelnen Photonen begegnen. Die Schnittmenge zwischen der Welt der Entdecker und der der Praktiker wird also in Zukunft wachsen.

Die Quantentechnologie lässt sich daher nur in einer breiten interdisziplinären Anstrengung entwickeln. Das IQST deckt einen wesentlichen Bereich dieser Breite ab. Hier arbeiten Physiker, Chemiker, Biologen, Mathematiker und Ingenieure in großer räumlicher Nähe zusammen. Die experimentellen Arbeiten werden dabei von Theorie-Experten begleitet. Exzellente Forscher, einige von ihnen sind weltweit bekannte Vertreter ihres Faches, erforschen mehrere der vielversprechendsten Teilgebiete der Quantenphysik. Sie widmen sich sowohl einzelnen Quantenobjekten wie etwa Atomen oder Lichtteilchen, aber auch komplexen Systemen wie Sensoren aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder Graphen sowie Festkörpern wie den Hochtemperatur-Supraleitern.

In Stuttgart und Ulm finden Entdecker und Praktiker zusammen, um Neues leichter in die Anwendung zu bringen. Ziel ist es, das oft beklagte „Valley of Death“ zu überbrücken, d.h. zu verhindern, dass für die Technik interessante Schlüsselergebnisse aus der Grundlagenforschung für die Technik brach liegen, oder in anderen Ländern, beispielsweise in den USA oder Asien, zu Geschäftsmodellen weiterentwickelt werden. Als Aktivposten für das IQST sind die vielfältigen Kontakte seiner Mitglieder in die Industrie zu nennen. Teilweise befinden sich quantentechnologische Apparate bereits in der Prototypenphase und werden von der Industrie getestet.

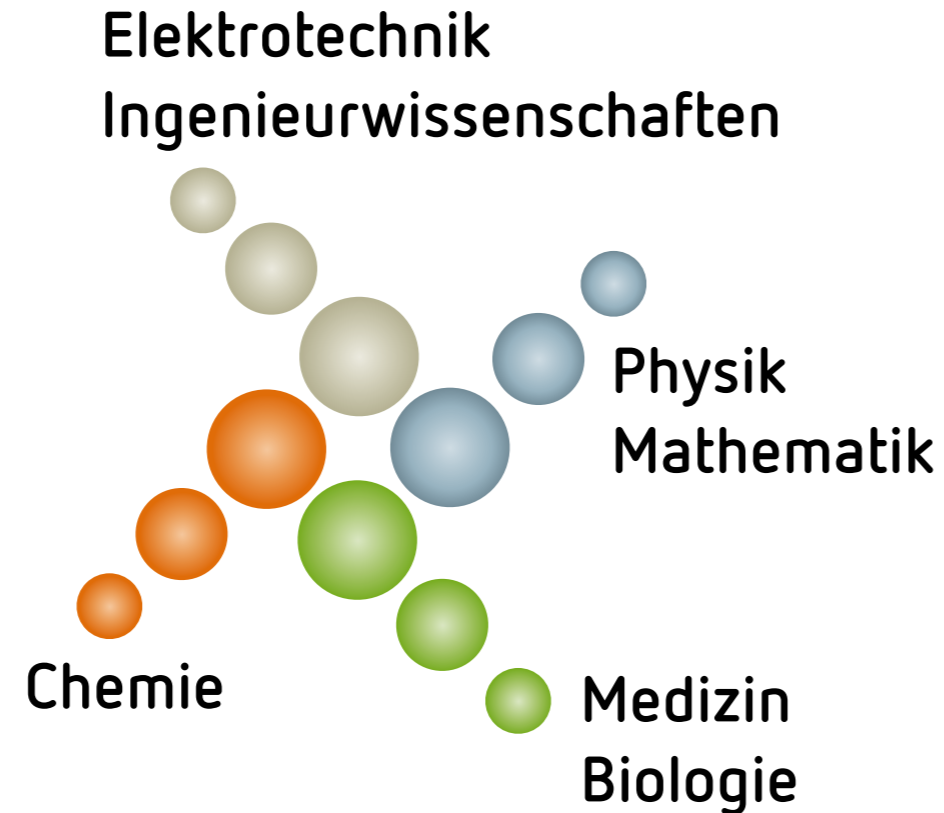
Computervisualisierung des Experiments zur Kernspin-Detektion. Mit einem einzelnen Farbzentrum in Diamant (roter Punkt) lässt sich das Kernspin-Magnetfeld eines wenige Nanometer großen Volumens (farbiger Tropfen, obere Bildhälfte) nachweisen. Klinische Kernspintomografen machen bislang nur Objekte sichtbar, die größer sind als ein paar Mikrometer. Damit ließen sich also biologische Moleküle wie Antikörper betrachten.

Die Quantenphysik regiert die Welt der Materie nicht nur auf der Ebene von Atomen, Elektronen oder Photonen. Mit anderen Worten: Nicht nur der Mikrokosmos gehorcht ihren Regeln.

Damit ist das IQST ein in Deutschland einmaliger Zusammenschluss, der nicht nur dank international sehr gut vernetzter und bekannter Forscherpersönlichkeiten, sondern auch wegen seiner das gesamte Feld der Quantenwissenschaft und -technik umfassenden Struktur zunehmende Wahrnehmung in der Fachwelt genießt. In naher Zukunft kann das IQST zu einem weltweit sichtbaren Leuchtturm in seinem Fachgebiet heranwachsen.

Was die Forschung am IQST weiter auszeichnet, ist auf der einen Seite eine große Entdeckungslust sowie ein Mut zum Ausprobieren seiner Grundlagenforscher. Sie spielen mit einzelnen Atomen oder Photonen und Lichtteilchen. Dabei erzeugen sie Erscheinungsformen der Materie, die nie zuvor beobachtet worden sind. Oder sie versuchen, neue Materialien mit ungesesehenen elektrischen Eigenschaften herzustellen, oder testen neue Arten von quantenoptischen Bauelementen.

Auf der anderen Seite haben die Forscher dabei stets die Anwendung im Blick. So versuchen sie, technisch interessante Quanteneffekte bei Raumtemperatur zu beobachten oder sie in technisch integrierbare Komponenten zu verlegen. Sie erforschen Materialien, in denen die hochsensiblen Qubits vor störenden Umwelteinflüssen geschützt sind, und entwickeln Verfahren für den möglichst effizienten Betrieb von Quantencomputern. Auf diese Weise erhöht sich die Chance, dass diese bislang eher akademischen Konzepte technische Anwendungen finden.



Im IQST werden die verschiedenen Teildisziplinen zusammengeführt und die interdisziplinären Aktivitäten intensiviert.

Bislang haben Forscher noch keine Größengrenze gefunden, ab der Materie nur noch den Gesetzen der klassischen Physik gehorchen würde. Ein supraleitendes Kabel von mehreren Kilometern Länge kann als ein zusammenhängendes Quantensystem beschrieben werden, wie Bernhard Keimer, Physiker und IQST-Mitglied vom Max-Planck-Institut für Festkörperphysik Stuttgart betont. An diesem System seien mehr Elektronen beteiligt, als es Sandkörner auf der Erde gibt, sagt Keimer, eine Zahl mit mehr als 20 Dezimalstellen. Das IQST deckt einen weiten Teil der Bandbreite an Quantensystemen ab: von Einzelteilchen wie Atomen oder Photonen, bis zu komplexen Systemen wie Graphen, Halbleiterbauelemente oder eben Supraleiter. Im Folgenden werden exemplarisch Forschungsgebiete an unterschiedlich komplexen Systemen vorgestellt.

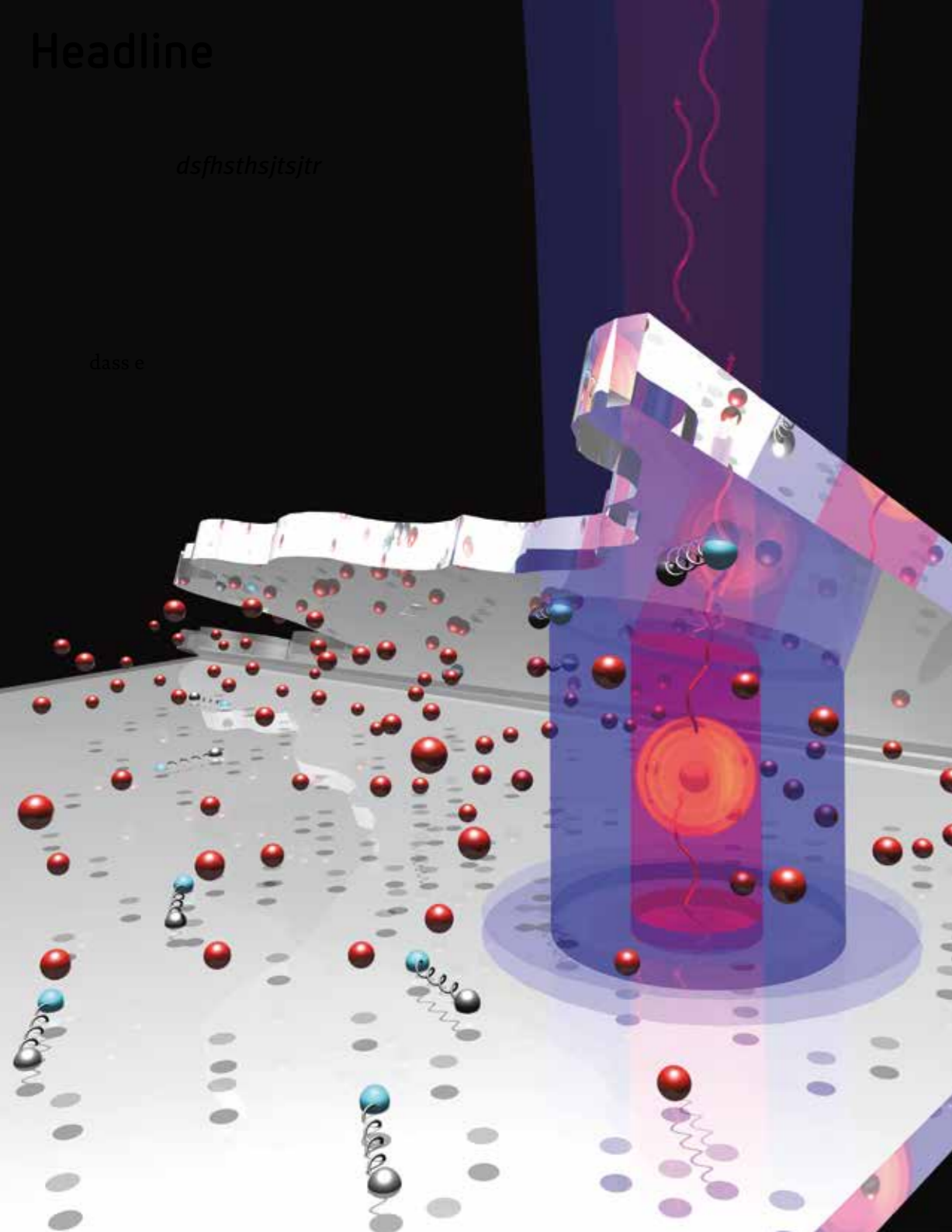
Rydberg-Atome: Tausendsassa der Quantentechnik.

Eine wahres Füllhorn für die Entdecker im IQST sind Atome, bei denen ein Elektron 10.000 Mal weiter vom Atomkern entfernt ist als die restlichen Elektronen. In diesem „Rydberg-Zustand“ (benannt nach dem schwedischen Physiker Johannes Robert Rydberg, 1834-1919) reagiert das Elektron sehr empfindlich auf äußere Einflüsse. Ein Bild dafür sind an Federn hängende Kugeln. Näher am Atomkern kreisende Elektronen erfahren eine starke Anziehungskraft von

diesem, sie hängen quasi an einer harten Feder, die trotz starkem Ziehen kaum auszulenken ist. Das Elektron im Rydberg-Zustand wird nur noch schwach am Atom gehalten. Es hängt sozusagen an einer weichen Feder und reagiert schon auf leichtes Ziehen.

Auf diese Weise lässt sich ein einzelnes Photon nachweisen. Für ihre entsprechende Arbeit haben Serge Haroche und David Wineland 2012 den Nobelpreis für Physik erhalten. Forschungen an Rydberg-Atomen bergen auch in Zukunft das Potenzial für Aufsehen erregende Ergebnisse. In Stuttgart widmet sich das Team von Tilman Pfau (5. Physikalisches Institut) dem Studium von Rydberg-Atomen. Weltweit erstmals demonstrierte das Team, zeitgleich mit einer Gruppe des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching, dass ein einziges Photon einen Lichtstrom substanziell abschwächen kann. Somit hat es einen optischen Transistor geschaffen. Solche Bauelemente könnten einmal das Basiselement von optischen Computern bilden, Rechnern also, die statt mit elektrischen Strömen mit Licht arbeiten und daher gleichzeitig leistungsfähiger und energiesparender sein könnten.

Das Problem dabei war lange Zeit, dass Photonen kaum miteinander wechselwirken, sodass ein Photon das andere nicht bremsen kann. Rydberg-Atome vermitteln und verstärken die Wechselwirkung zwischen dem Photon und dem Lichtstrahl. Das tun sie so effizient,

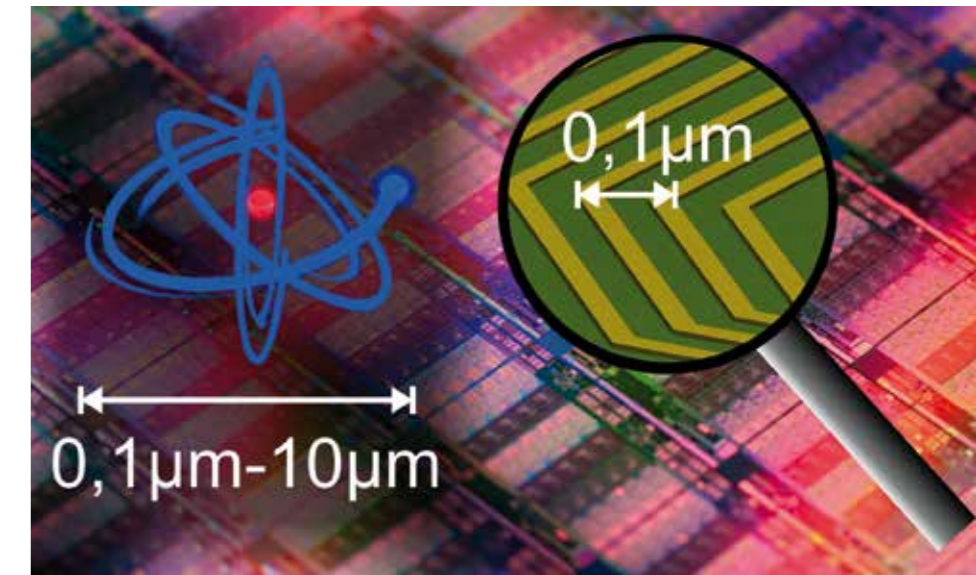


Um atomare Gase gut spektroskopieren zu können, werden sie in eine Glaszelle bei sehr geringem Druck eingefüllt. Wenn eines dieser Atome (rote Kügelchen) in der Nähe der Glaswand dieser Spektroskopiezelle durch Laserlicht in einen Rydberg-Zustand angeregt wird, reagiert dieses sehr empfindlich auf Schwingungen der Moleküle (türkisfarbene und graue Kügelchen mit Feder) im Glas. Die Rydberg-Atome verhalten sich also wie ein Sensor für temperaturabhängige Prozesse im Glas.

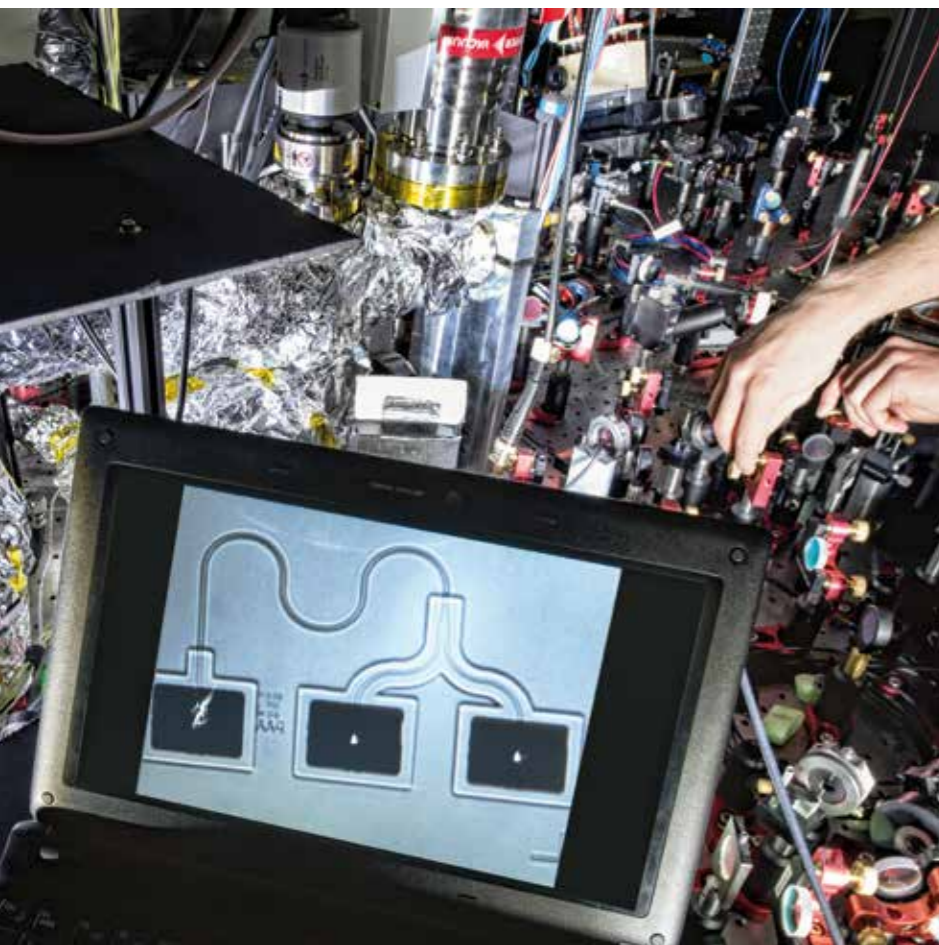
ein einziges Schalt-Photon eine Gaswolke intransparent für mehr als 30 Photonen macht.

Einzelne Photonen benötigt man auch für die Quantenkryptografie. Herkömmliche Lichtquellen wie LEDs oder Laser emittieren jedoch Portionen aus mehreren Photonen. Rydberg-Atome wirken wie Drehtüren für Photonen, können also aus Gruppen von Photonen einen Zug aus Einzelphotonen machen. Tilman Pfau's Team arbeitet daran, diesen Effekt für die Technik nutzbar zu machen, indem es ihn bei Raumtemperatur in einer speziellen Glasfaser umsetzt. Die Physiker konnten schon zeigen, dass in Fasern „eingesperrte“ Rydberg-Atome die Eigenschaften freier Rydberg-Atome behalten, also für den Drehtüreffekt genutzt werden können.

Die Sensitivität von Rydberg-Atomen prädestiniert sie als Sensoren für Magnetfelder oder elektrische Felder. Das Team von Tilman Pfau hat wenige Zentimeter kleine Dampfzellen entwickelt, in denen einzelne Atome bei Raumtemperatur zu Rydberg-Atomen angeregt werden können. In Zusammenarbeit mit dem am IQST benachbarten Institut für Großflächige Mikroelektronik (IGM) soll die Zelle nun weiterentwickelt werden. Mit industrienaher Herstellungstechnik soll die Sensorelektronik in die Zelle integriert werden. Das IGM hat dabei stets die spätere Tauglichkeit für die Massenherstellung im Auge.

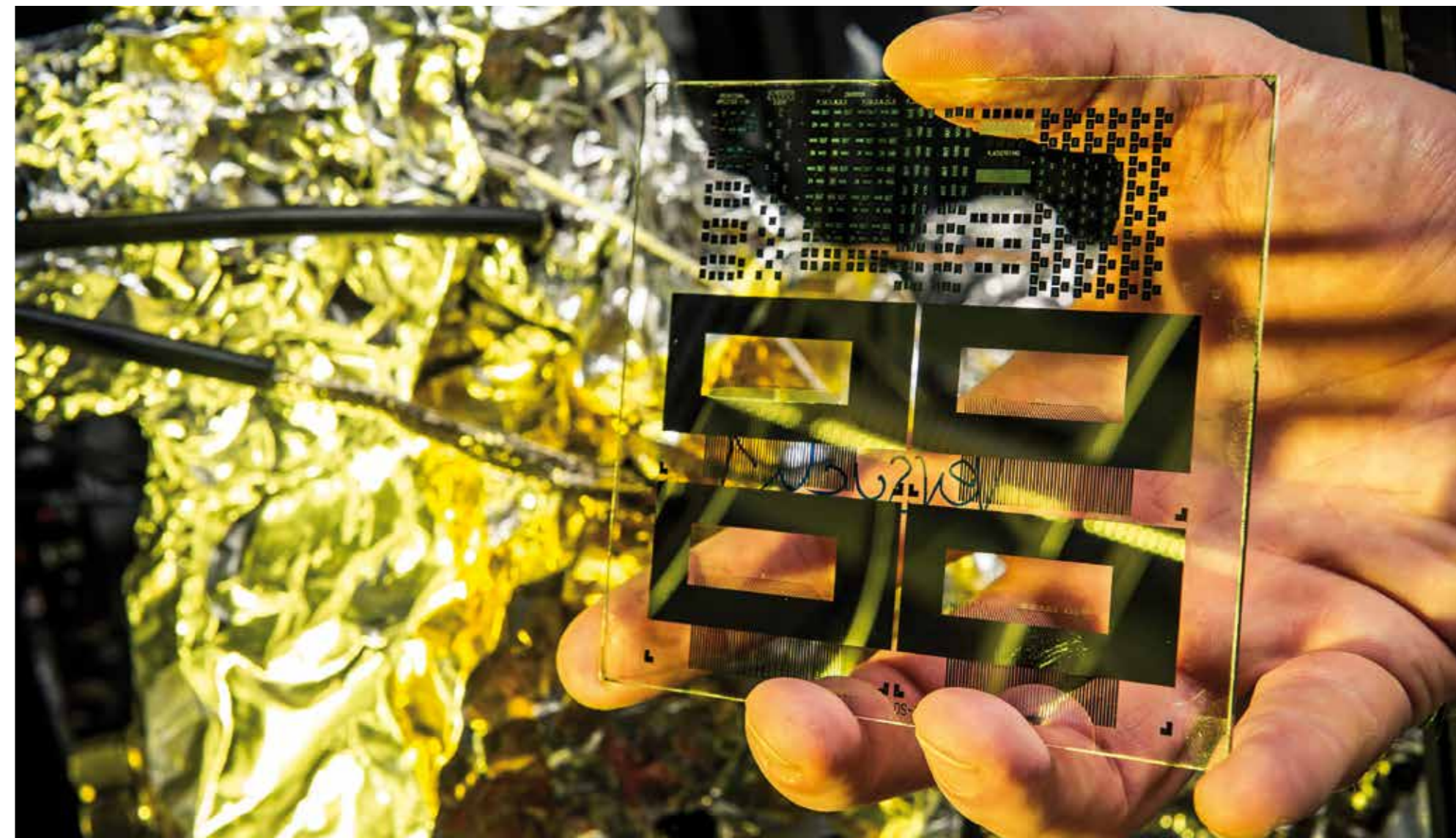


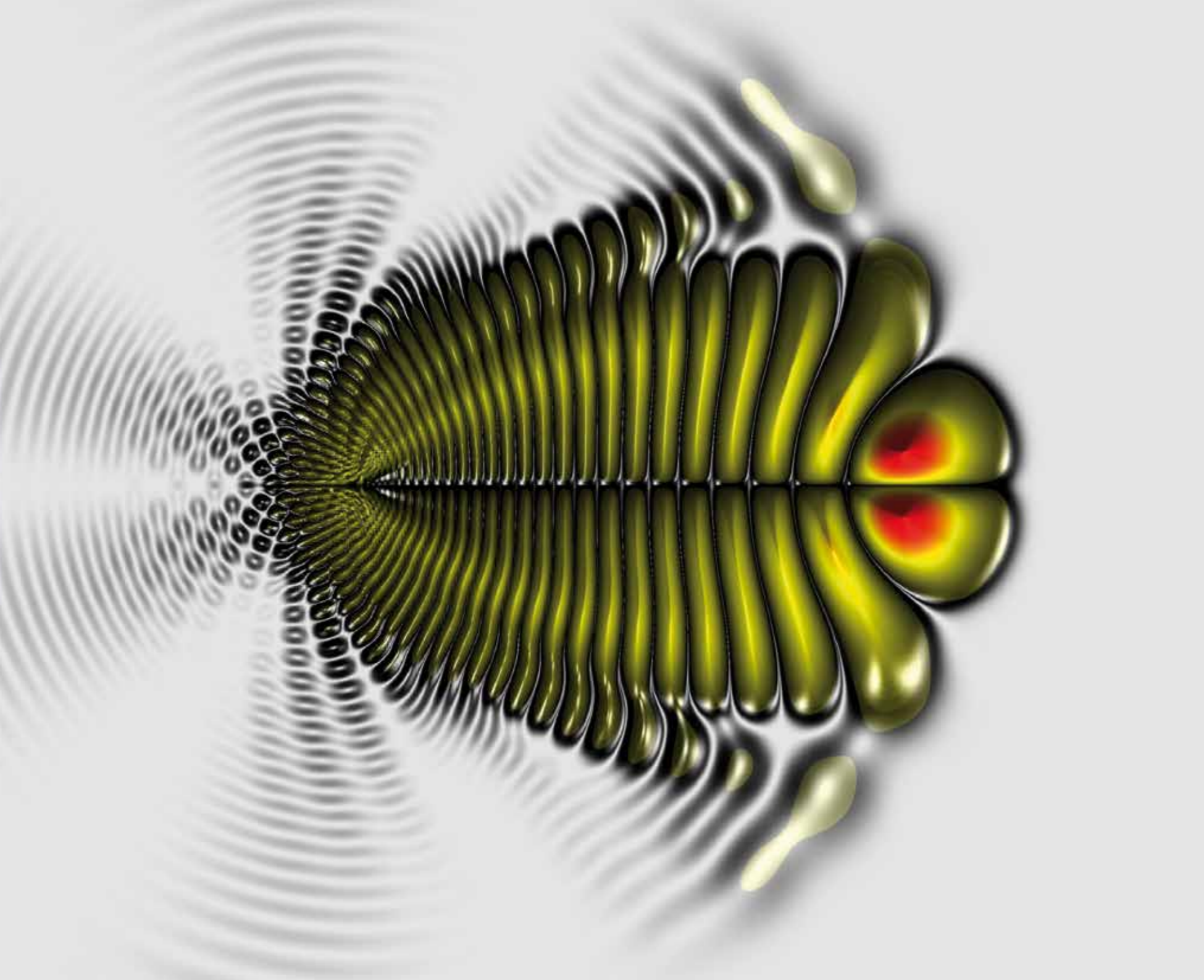
Groß statt Klein: Während moderne Computerprozessoren immer kleiner werden, setzen die Stuttgarter Forscher auf Riesenatome zur Quanteninformationsverarbeitung. Diese sogenannten Rydberg-Atome sind bis zu 100-mal größer als die Leiterbahnen auf modernen Prozessorchips. Sie lassen sich gezielt einzeln mit einem Laserstrahl anregen und somit als Einzelphotonenquelle verwenden. (Hintergrundfoto: Intel)



Auch besonders faszinierende Physik lässt sich mit Rydberg-Atomen betreiben. Dabei entdecken die Stuttgarter Physiker neue Erscheinungsformen der Materie. So können zwei Rydberg-Atome ein ungewöhnliches Molekül binden. Beim Rydberg-Molekül sind die beiden Atomkerne nicht nur sehr viel weiter voneinander entfernt als bei einem herkömmlichen Molekül. Der Bindungsmechanismus unterscheidet sich grundsätzlich von den aus der Chemie bekannten Bindungstypen. Das IQST erweitert also das Spielfeld der Chemie.

Ähnlich wie in der Mikroelektronik Leitungen für elektrischen Strom gibt es Leiterbahnen für Photonen. In mikroskopisch kleinen Glasstäbchen kann sich das Licht mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und ist damit viel schneller als ein elektrischer Strom. Für Strom gibt es schon viele integrierte Bauteile wie Schalter, Speicher etc. Für Licht müssen Bauteile erst entwickelt werden, vor allem wenn man die quantenmechanischen Eigenschaften des Lichts ausnutzen will. Dazu nimmt man Lichtteilchen, die erst mal nicht miteinander wechselwirken, und bringt sie in ein optisch aktives Medium, z. B. ein Gas aus Rubidium-Atomen. Dadurch lässt sich das Lichtfeld manipulieren. Kombiniert man beide Techniken, entsteht eine Schnittstelle zwischen der immateriellen Welt der Photonen und der materiellen Welt der Elektronik. In einem ersten Versuch konnte nun so eine mikroskopisch kleine Schnittstelle in einem optischen Netzwerk realisiert werden.





Dass Rydberg-Atome, obwohl im gasförmigen Zustand, für einen sehr kurzen Moment zu einem Glas einfrieren können, zeigten die Stuttgarter IQST-Forscher ebenfalls. Dieser exotische Zustand eines gasförmigen Glases wurde bei Raumtemperatur hergestellt, was zuvor in Fachkreisen für unmöglich gehalten worden war.

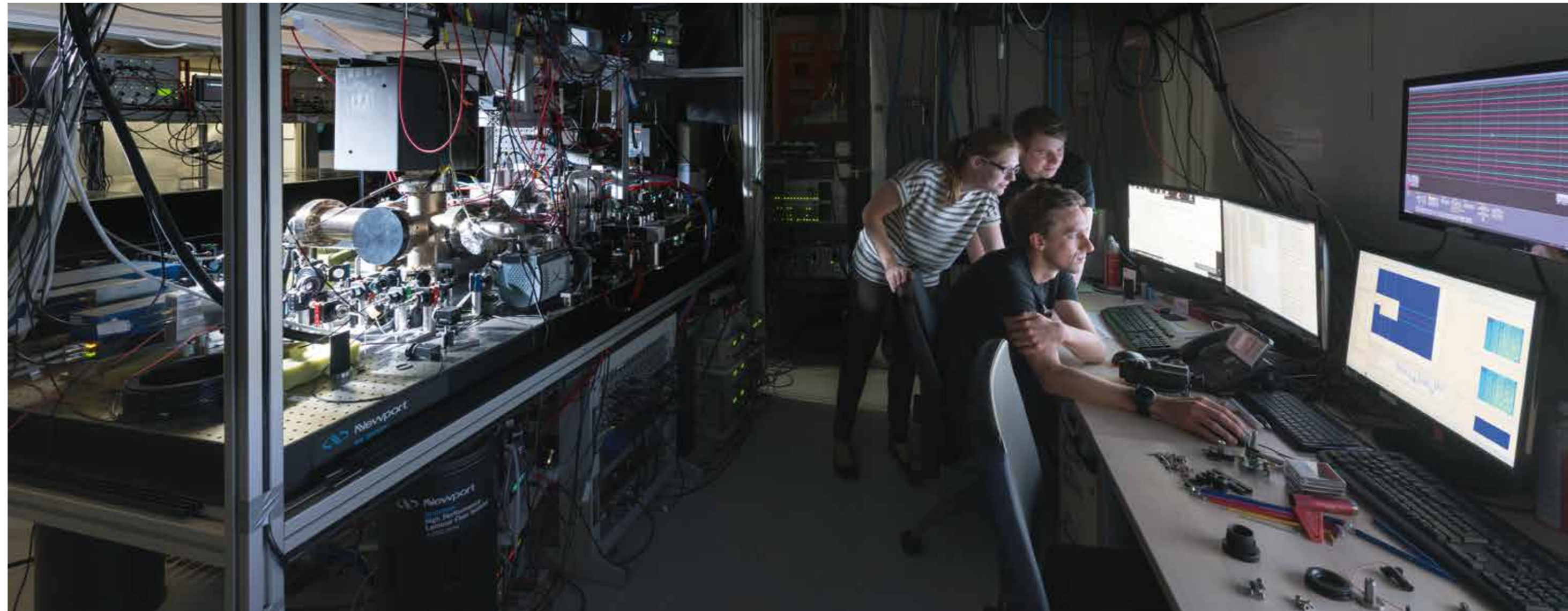
Quantenmechanische Wellenfunktion eines riesigen Rydberg-Moleküls, das aufgrund seiner Form auch als Trilobit-Zustand bezeichnet wird. Ein Rydberg-Molekül ist eine Verbindung aus einem Rydberg-Atom und einem nicht angeregten, also „normalen“ Atom. Es erreicht die Größe eines Mikroorganismus. An einem Mikroskop, mit dem man diese Moleküle direkt betrachten kann, arbeiten die Forscher aktuell.



Gefrorenes Gas aus Rydberg-Atomen.

Eine weitere Premiere plant Pfaus Team mit der Abbildung eines einzelnen Rydberg-Atoms durch ein Mikroskop. Die Atome haben eine Größe von einigen hundert Nanometern, weshalb sie prinzipiell im Lichtmikroskop sichtbar sein sollten. Doch weil die Atomwolke, in der sich das Rydberg-Atom befindet, Licht stark absorbiert, gleicht das Vorhaben dem Fotografieren im Nebel. Es gibt zwar besondere Mikroskopie-Verfahren, die das können, die aber im Umfeld des komplexen Stuttgarter Experiments schwierig umzusetzen sind. Wenn die IQST-Forscher erfolgreich sind, wird es die aus der Schulphysik bekannten Atomorbitale, die an Hanteln, Kegel oder Donuts erinnern, als Fotografie geben. Ein faszinierender Gedanke.

Experimenteller Aufbau für das Mikroskop, das Rydberg-Atome sichtbar machen soll. Das wäre das erste Mal, dass ein Atom unter einem optischen Mikroskop zu sehen ist.



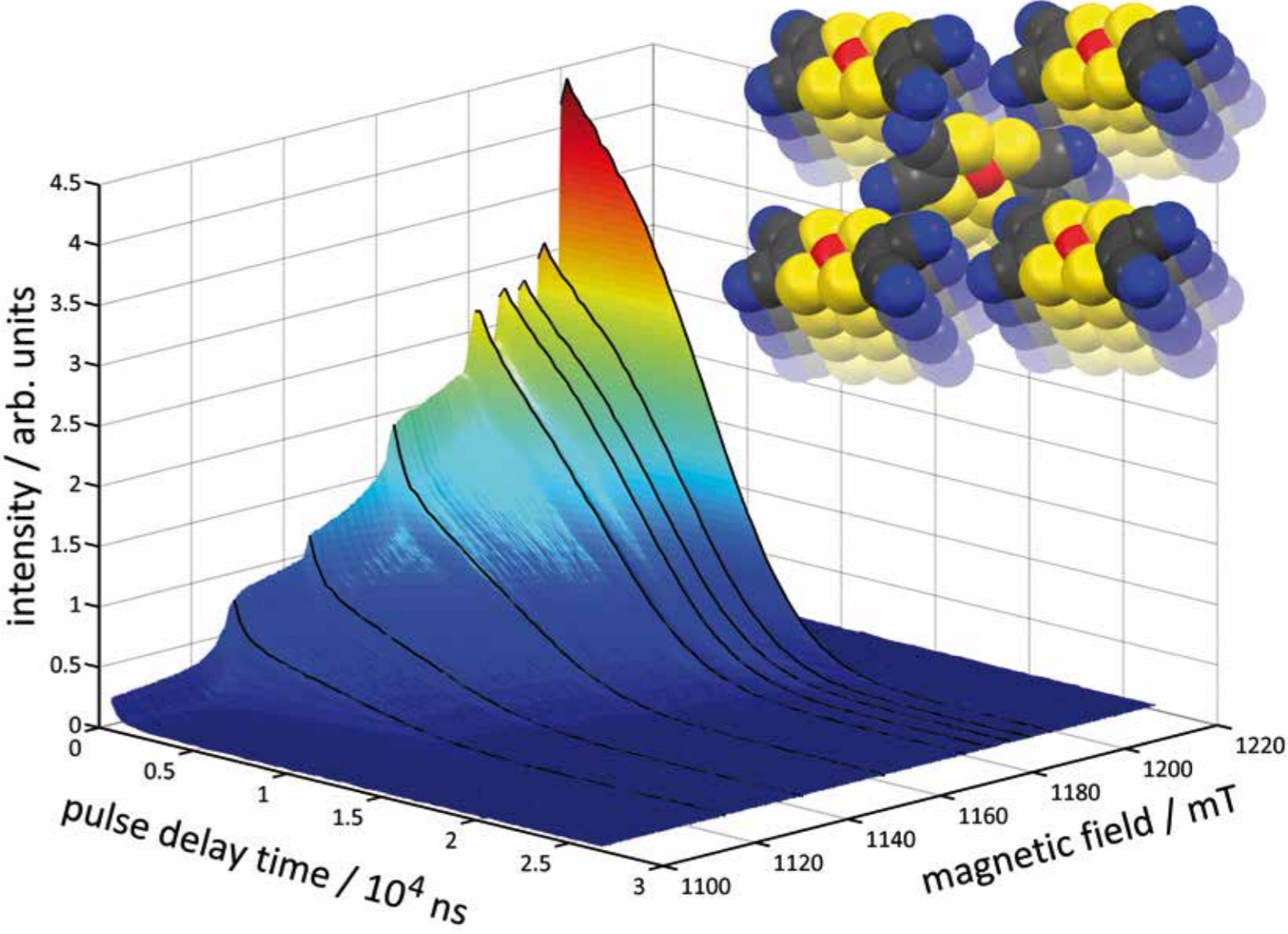
Quantentechnik aus dem Baukasten der Chemie

Der IQST-Forscher Joris van Slageren verkörpert das fachübergreifende Wesen der Quantenwissenschaft. Der ausgebildete Chemiker mit Habilitation in der Physik betritt Neuland, indem er Chemie und Quantenphysik verbindet.

Van Slageren entwickelt am Institut für Physikalische Chemie der Universität Stuttgart molekulare Quantenbits, also Moleküle, die zwei verschiedene magnetische Ausrichtungen gleichzeitig tragen können. Ein solcher Superpositionszustand ist, als ob eine Kompassnadel simultan nach Norden und Süden zeigen würde. Eine solche Parallelexistenz von Möglichkeiten gibt es in der klassischen Physik nicht. „Wir hoffen, dadurch logische Operationen zu verwirklichen, die mit klassischen Methoden nicht umsetzbar sind“, sagt Joris van Slageren. Das aus Chemikern, Physikern und physikalische Ingenieuren bestehende Team des IQST-Forschers versucht, neuartige Qubits aus Metallkomplexen zu verwirklichen. Dabei wird genau darauf geachtet, dass die gezielt eingebauten restlichen Atome im Molekül den Superpositionszustand nicht stören. Der Vorteil solcher Qubits ist ihre Skalierbarkeit. Bei der Entwicklung von Quantencomputern ist die ungenügende Skalierbarkeit ein großer Hemmschuh: Der Ausbau von wenigen auf Hunderte oder Tausende Qubits bringt in bisherigen Systemen einen unvermeidbaren Aufwand mit sich. „Durch Selbstassemblierung lassen sich Hunderte von Qubits regelmäßig auf einer Oberfläche anordnen“, erklärt Joris van Slageren. Jedes Molekül sitze dabei an einem exakt vorherbestimmten Platz. Die Regelmäßigkeit sei für das Device unverzichtbar, damit der Schreib- und Lesekopf die Qubits einwandfrei finde. Zum anderen erlaubt

sie die Wechselwirkung zwischen den Qubits mittels sogenannter Liganden (lat. ligare = „binden“) zu steuern. Dabei handelt es sich um am Metallkomplex hängende Molekülgruppen, die eine eventuell schaltbare Verbindung zwischen den Qubits herstellen. Dadurch lässt sich auch eine wichtige Ressource für das Quantencomputing herstellen: die so genannte Verschränkung zwischen Qubits.

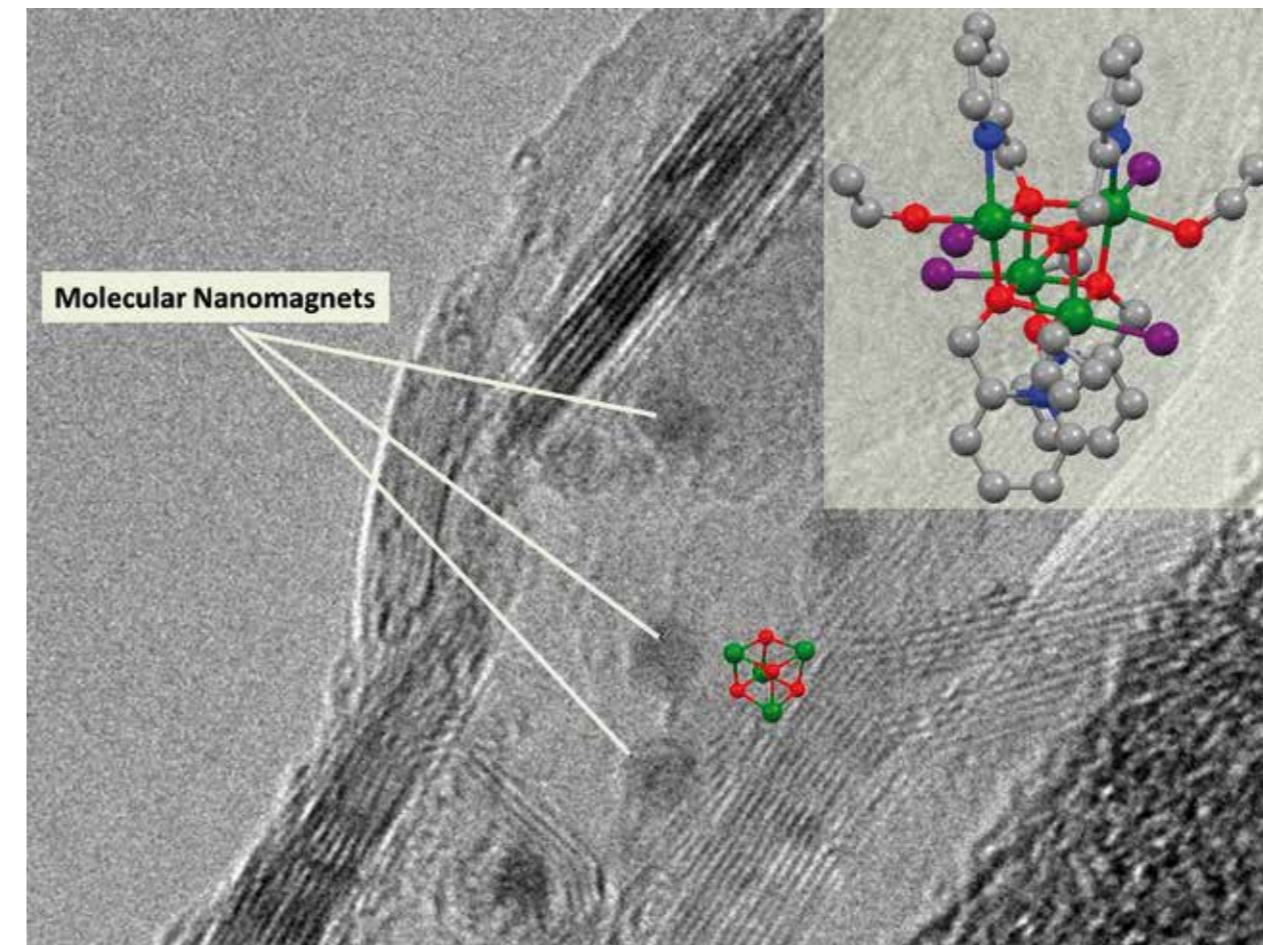
Damit sich mit Qubits sinnvoll rechnen lässt, müssen die Überlagerungszustände eine lange Kohärenzzeit aufweisen. Die Abbildung zeigt die Struktur eines potenziellen Qubits (oben rechts) und die dreidimensionale Darstellung der Kohärenzzerfallskurven und deren Magnetfeldabhängigkeit. Sie zeigt, dass die Kohärenzzeit, unabhängig von der Orientierung des Moleküls, sehr lang ist.



Am Institut für Halbleitertechnologie der Universität Stuttgart forscht Jörg Schulze an neuartigen Halbleiterbauteilen mit speziellem Fokus auf spintronische Anwendungen. Bei der sogenannten Spintronik wird der Elektronenspin, als zusätzliche Eigenschaft von Elektronen, zur Signalübertragung genutzt. Der Spin ist neben der elektrischen Ladung eine zusätzliche Eigenschaft von Elektronen, die zur Signalübertragung genutzt werden soll. Es handelt sich dabei um eine Art Drall, der Teilchen zu winzigen magnetischen Kompassnadeln macht. Der Vorteil ist, dass beim Betrieb spintronischer Bauteile weniger Wärme freigesetzt wird. Die freigesetzte Wärme wird immer mehr zu einem limitierenden Problem bei der weiteren Leistungssteigerung herkömmlicher Computerchips. Zusammen mit Joris van Slageren arbeitet Schulze an neuartigen Ansätzen, molekulare Quantenbits mit Siliziumtechnologie zu verbinden. „Wir sehen großartige Möglichkeiten, die molekulare Quantenbits mit unseren Technologien zu steuern und auszulesen“, sagt Schulze.

Die Verknüpfung von molekularen Quantensystemen mit elektrisch leitfähigen Kohlenstoffnanomaterialien öffnet eine weitere neue Dimension in der Elektronik, die molekulare Nanospintronik. Beim Übergang von der Mikroelektronik zur Nanoelektronik gelten viele CNT (kurz CNT von engl. carbon nanotubes) oder das „Wundermaterial“ Graphen als Nachfolger des Siliziums. Denn in diesen

Materialien bewegen sich Elektronen sehr schnell. Die Leitfähigkeit des Hybridsystems lässt sich durch gezieltes Beeinflussen der Ausrichtung der molekularen Magnetisierung ein- und ausschalten. Eine weitere Idee ist das Kohlenstoffnanomaterial zur schaltbaren Kopplung der Quantenbits zu verwenden. Aus dem Baukasten der Chemie könnten also neuartige Bauteile für einen Quantencomputer kommen, die dessen Verwirklichung erleichtern.



Mittels der Transmissionselektronenmikroskopie können Moleküle sichtbar gemacht werden. Die Abbildung zeigt würfelförmige molekulare Nanomagnete, die in das Innere von Kohlenstoffnanoröhren gebracht wurden, und die vollständige molekulare Struktur oben rechts.

Verschränkte Photonen erschnuppert Einzelmoleküle

Bislang als ehern angesehene Grenzen der Empfindlichkeit von Sensoren lassen sich mithilfe der Quantenphysik überwinden. Forscher des IQST wollen so extrem feine künstliche Nasen bauen.

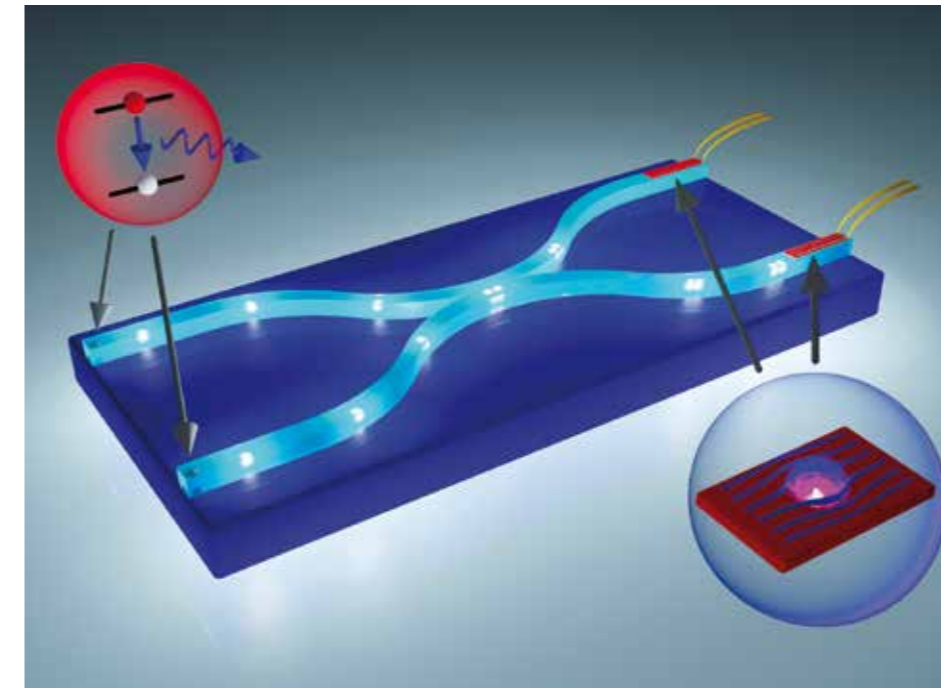
Die Verschränkung von Zuständen ist nicht nur für die Quanteninformationstechnologie von entscheidender Bedeutung, sie kann auch die Empfindlichkeit von Sensoren über Grenzen hinaus steigern, die lange als unüberwindbar galten. Das sogenannte Schrotrauschen ist eine dieser Grenzen. Es macht sich z. B. auf Digitalbildern bemerkbar, die im Halbdunkeln geschossen wurden. Einzelne Pixel variieren zufällig und ohne Bezug zum eigentlichen Motiv in Farbe und Helligkeit. Ursache sind (neben dem Rauschen der Elektronik des Bildsensors) zufällige Schwankungen in der Zahl der Photonen, die auf den Sensor treffen. Physiker konnten zeigen, dass sich dieses Rauschen mithilfe verschränkter Photonen unterdrücken lässt. Denn verschränkte Photonen sind nicht mehr unabhängig voneinander, weswegen auch ihre Fluktuationen zusammenhängen und sich daher gegenseitig neutralisieren können. Sie zeigten in einem aufwendigen Versuchsaufbau, dass sich die Bildqualität so verbessern lässt.

Auch für die Verbesserung anderer Arten von Sensoren lassen sich verschränkte Photonen nutzen. Am IQST arbeitet Peter Michler vom Institut für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen der Universität Stuttgart zusammen mit seinem Kollegen Boris Mizaikoff vom Institut für Analytische und Bioanalytische Chemie von der Universität Ulm daran. Der neue Sensorchip soll Einzelmoleküle mithilfe der sogenannten Interferometrie nachweisen. Eines von

zwei Lichtsignalen wechselwirkt mit dem Molekül und wird so ein wenig gebremst. Der dabei entstehende Laufzeitunterschied bewirkt, dass sich die Lichtsignale verstärken oder abschwächen, wenn sie miteinander überlagert werden. Um ein einziges Molekül zu finden, muss ein sehr kleiner Laufzeitunterschied gemessen werden, was mit klassischem Licht kaum möglich ist. Durch die Verwendung von verschränkten Photonen kann die natürliche Grenze des Schrotrauschens für klassisches Licht unterschritten werden, was letztendlich die Detektion von kleineren Laufzeitunterschieden ermöglicht.

Mit seiner Kompetenz im Bereich Halbleiteroptik entwickelt Michlers Team die Lichtquelle für die Erzeugung der verschränkten Photonen auf einem Halbleiterchip.

Die Miniaturisierung und praktische Anwendbarkeit dieser hochsensitiven Sensortechnologie steht somit im Mittelpunkt. Die Herausforderungen sind groß. Die IQST-Forscher versuchen Quellen für einzelne Photonen auf der Basis von Quantendots auf einen Chip zu integrieren. Um zwei verschränkte Photonen zu erzeugen, müssen zwei absolut identische Photonen auf dem Chip erzeugt und überlagert werden. „Dies erfordert die Herstellung von nahezu identischen Quantendots auf dem Chip, die mithilfe von z. B. elektrischen Feldern auf die gleiche Emissionswellenlänge abgestimmt werden“, erläutert Michler die Schwierigkeit.



Schematische Abbildung eines Halbleiterchips zur Erzeugung und Detektion von verschränkten Photonenpaaren. Mit Hilfe von optisch angeregten Quantenpunkten werden einzelne Photonen (weiße Kugeln) in die einzelnen Wellenleiter (hellblau) emittiert. Im Zentrum des Chips berühren sich die Wellenleiter und es kommt zu einem Zwei-Photoneninterferenzeffekt, der zur Bildung von verschränkten Photonenpaaren, sogenannten NOON-Zuständen, führt. Die Photonen können anschließend auf der Basis von supraleitenden Einzelphotonendetektoren nachgewiesen werden.

Es geht bildlich gesprochen darum, künstliche Atome auf dem Chip zu integrieren.

Die Technologie könnte auch zur anstehenden Revolution des Messwesens beitragen, da sie sich im Prinzip für verschiedenste interferometrische Messungen nutzen lässt, z. B. für Abstandsmessungen. Die Forscher streben an, mehr als zwei Photonen auf Chips verschränken zu können, denn mit der Zahl der verschränkten Photonen steigt die Präzision der Sensorik.

Auch für die Quantenkryptografie könnten auf Chips integrierte Einzelphotonenquellen von großem Nutzen sein.

Die Forschung von Michlers Team zeigt besonders eindrücklich, wie am IQST verschiedene Kompetenzen, hier die Halbleiterphysik und die Quantenoptik, ineinanderfließen und ein Potenzial für innovative Technologien schaffen.

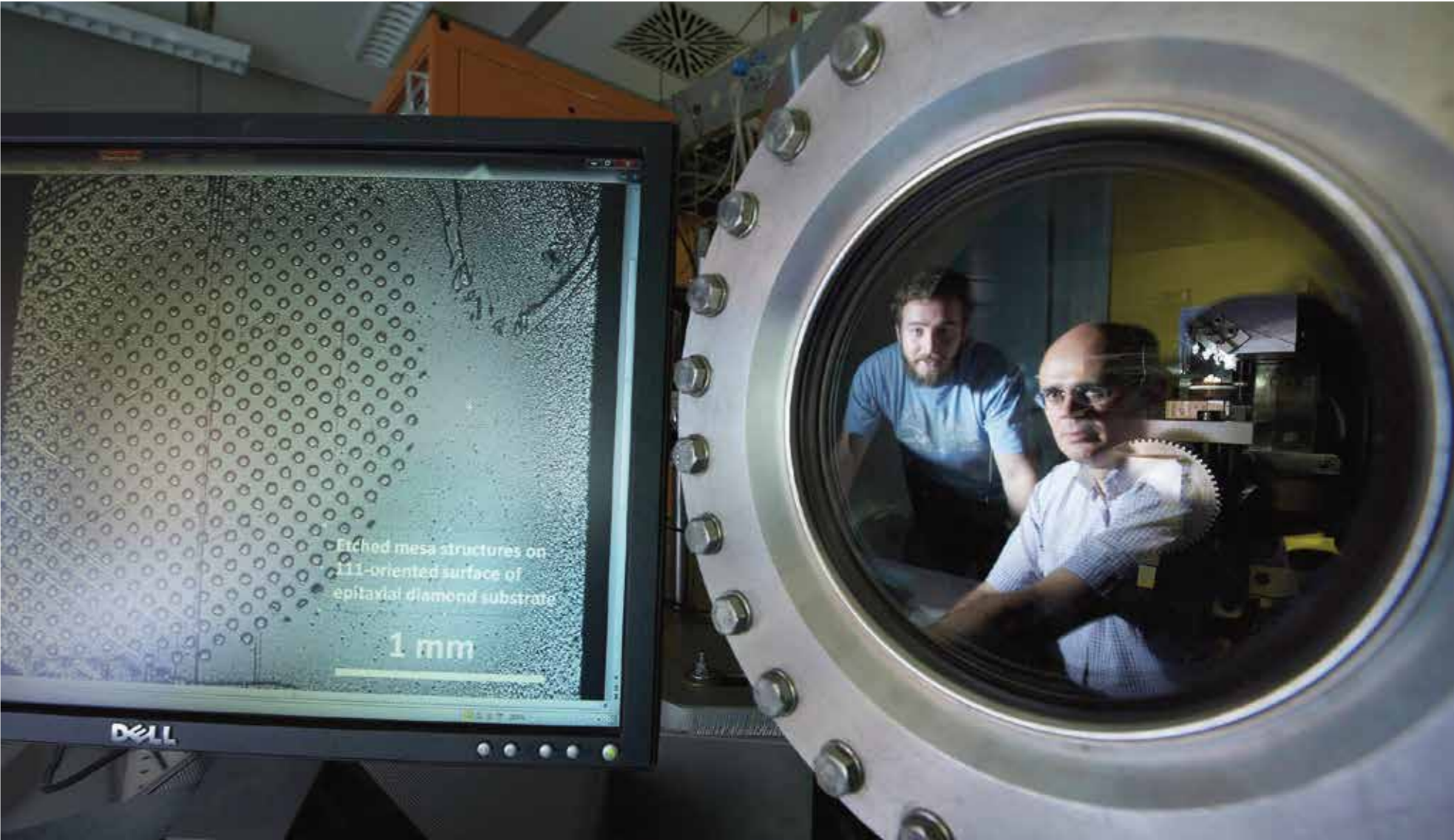
Diamanten im Herz des Quantencomputers

Forscher in aller Welt probieren viele Möglichkeiten, einen Quantencomputer zu bauen. IQST-Forscher um Jörg Wrachtrup aus Stuttgart sind Pioniere bei einem der vielversprechendsten Ansätze. Wichtige Grundkomponenten eines Quantencomputers haben sie schon entwickelt.

Auch die Entwicklung eines praxistauglichen Quantencomputers benötigt eine Mischung aus mutiger Grundlagenforschung, die neue Ideen ausprobiert, und eine Anwendungsorientierung, die schon in frühen Phasen der Technologieentwicklung die spätere Anwendbarkeit mitdenkt. Beide Aspekte vereint das IQST, wobei auch hier experimentelle und theoretische Physiker zusammenarbeiten. Einen leistungsfähigen Quantencomputer, der für alltagsrelevante Probleme oder für die Lösung von Forschungsaufgaben genutzt werden kann, gibt es noch nicht. In einem solchen Rechner müssten Tausende von Qubits zusammenarbeiten. Neben der Schwierigkeit der Skalierung gibt es ein weiteres gewichtiges Problem: die so genannte Dekohärenz. Sie ist eine Folge störender Umwelteinflüsse. Schon eine geringe Wechselwirkung der Qubits mit der Umwelt, etwa mit eindringenden Photonen, kann einen Rechenvorgang im Quantencomputer stören. Zwar entwickeln Forscher immer wirksamere Korrekturverfahren für durch Dekohärenz entstandene Fehler. Doch ist eine gute Abschirmung vor der Umwelt der beste Schutz vor Dekohärenz. Ihre Qubits schützen Forscher meist durch Vakuum bzw. äußerst niedrige Temperaturen nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt (-273 °C). Einer Routinenutzung des Quantencomputers stehen solche Anforderungen freilich im Weg. Die Qubits in Diamanten einzubetten verspricht störungsarm

funktionierende Quantencomputer bei Normalbedingungen. Das extrem harte Material wirkt sozusagen wie ein Schutzschirm für die Qubits. In anderen Materialien gibt es bei Raumtemperatur eine Vielzahl von Kristallschwingungen. Beim Diamanten hingegen benötigen diese Schwingungen mehr Energie, um angeregt zu werden, da sie eine höhere Frequenz besitzen. Daher sei das Innere eines Diamanten bei Raumtemperatur sehr ruhig, erklärt der IQST-Forscher Jörg Wrachtrup. Im Kristallgitter des Edelsteins kommt es erst bei einer heißeren Umgebung zu einem Chaos aus Vibrationen.

Eine der größten Herausforderungen beim Bau eines Quantencomputers ist es, die NV-Zentren (engl.: nitrogen-vacancy centers, Stickstoff-Fehlstellen-Zentren) auf den Nanometer genau zu platzieren. Darin haben IQST-Forscher eine hohe Expertise entwickelt. Mit Hilfe einer nanostrukturierten Implantationsmaske lenken sie Stickstoffionen zielgenau zu ihrem vorgesehenen Platz im Diamantkristall. Ein Zoom einer so strukturierten Diamantoberfläche, die für die Implantation bereit ist, ist auf dem Bildschirm (links) zu sehen. Die Implantationsinseln können einzeln adressiert werden, und dadurch Bereiche mit definiertem Abstand und Oberflächennähe der NV-Zentren erzeugt werden.

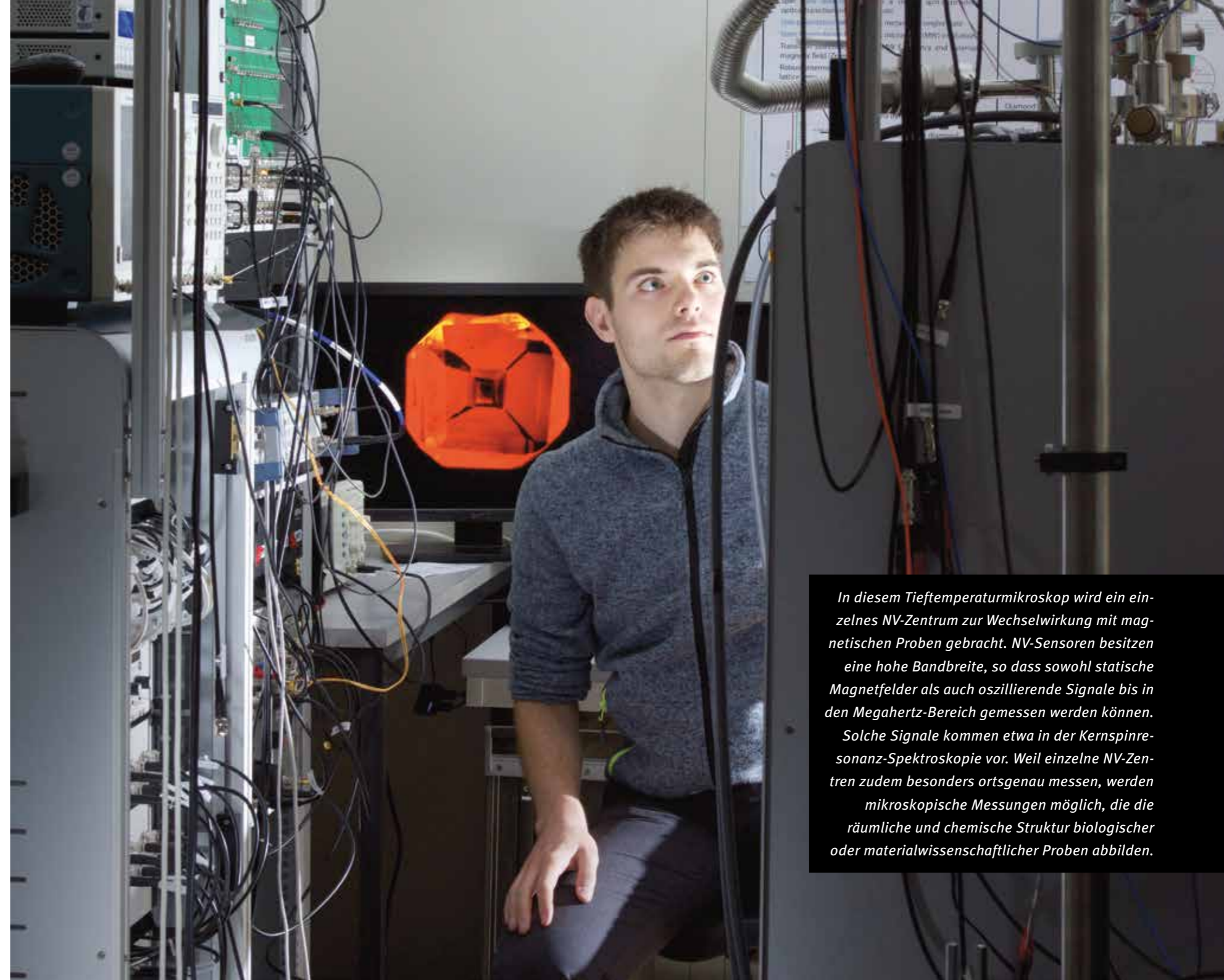


Der Physiker ist weltweit führend bei der Nutzung von so genannten NV-Zentren im Diamant als Qubits. „NV“ steht für nitrogen-vacancy, zu Deutsch: Stickstoff-Fehlstelle. Dabei handelt es sich um eine Unregelmäßigkeit im sonst einheitlich aus Kohlenstoff-Atomen aufgebauten Diamantgitter. Zwei benachbarte Kohlenstoff-Atome werden dabei durch ein Stickstoff-Atom und einen leeren Gitterplatz (Fehlstelle) ersetzt. Dieses System verhält sich wie ein Atom, das im Gitter gefangen und daher von seiner Umwelt isoliert ist. Es besitzt einen Elektronenspin, der lange genug in einem definierten Spinzustand verharrt, um ihn für das Rechnen im Quantencomputer nutzen zu können. Jörg Wrachtrup gehörte zu den ersten Wissenschaftlern, die das Potenzial des NV-Zentrums für den Quantencomputer erkannten.

Wrachtrups Team gelang es, ein wesentliches Bauelement eines Quantencomputers in einem Diamant zu realisieren: Ein sogenanntes Quantenregister. Darunter kann man sich eine Speicher- und Recheneinheit aus mehreren miteinander verschränkten Qubits vorstellen. Als Qubits dienen die Atomkerne zweier Kohlenstoff-Atome und eines Stickstoff-Atoms. Dieses Qubit-Trio steuern die Forscher über ein NV-Zentrum. Das NV-Zentrum eignet sich als „Sprachrohr“ für Steuerbefehle, weil sein Spin schnell auf Radiofrequenzpulse von außen reagiert und die Information an die Qubits des Registers weitergibt.

Jede Berechnung eines Computers besteht aus vielen Einzelschritten, „logische Operationen“ nennen das die Forscher. Die Stuttgarter IQST-Forscher setzten eine bestimmte logische Operation (ein sogenanntes CNOT-Gatter) in ihrem kleinen Diamant-Quantencomputer um. „Das alles gelingt bei Raumtemperatur“, sagt Jörg Wrachtrup stolz. Allerdings ist selbst der Diamant nicht völlig frei von Vibrationen, weshalb das Quantenregister hin und wieder Störungen ausgesetzt ist und sich daher „verrechnet“. Wrachtrups Team gelang es allerdings eine Methode zur Behebung solcher Fehler zu entwickeln. Es orientiert sich an Korrekturverfahren, wie sie in der herkömmlichen Telekommunikationstechnik eingesetzt wird. Dabei tragen drei Bits eine Informationseinheit; sie werden stets verglichen. Sollte eines fehlerhaft sein, wird in einer Art „Mehrheitsentscheid“ der Wert der beiden anderen als der gültige angenommen.

Nun wollen die IQST-Forscher die Anzahl der kooperierenden Qubits erhöhen. Die Hürde dabei besteht darin, NV-Zentren in regelmäßigen Abständen von weniger als 20 Nanometern in den Diamant zu bringen. „Das ist eine Herausforderung an die Nanotechnologie“, sagt Wrachtrup. „Wir bewegen uns an der Grenze des Machbaren“. Die Forscher verwenden dafür Metallmasken mit winzigen Löchern, durch die sie Stickstoff-Atome auf Diamanten schleudern. Weil ein NV-Zentrum kaum größer ist als ein einzelnes Atom und



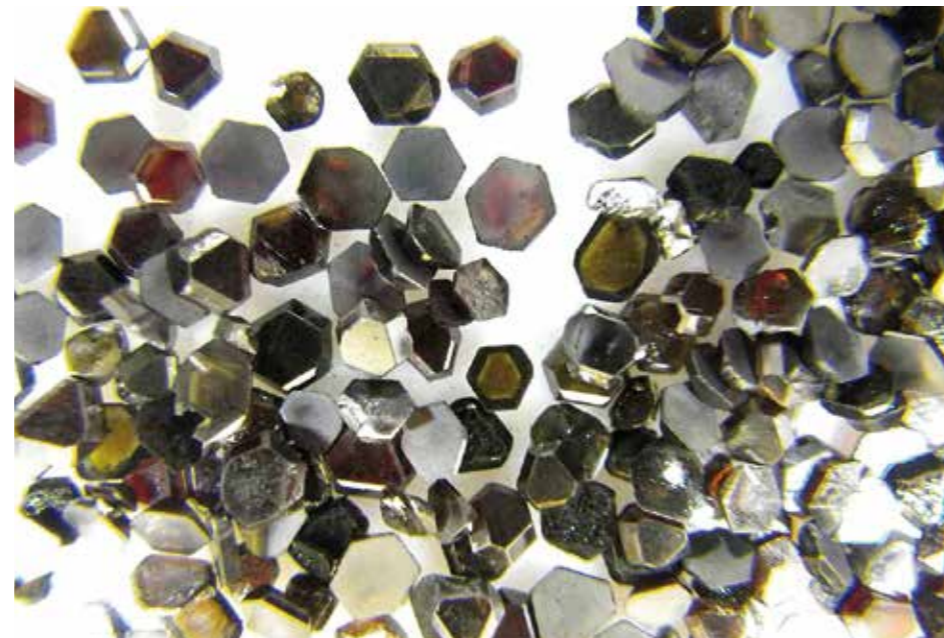
In diesem Tieftemperaturmikroskop wird ein einzelnes NV-Zentrum zur Wechselwirkung mit magnetischen Proben gebracht. NV-Sensoren besitzen eine hohe Bandbreite, so dass sowohl statische Magnetfelder als auch oszillierende Signale bis in den Megahertz-Bereich gemessen werden können. Solche Signale kommen etwa in der Kernspinresonanz-Spektroskopie vor. Weil einzelne NV-Zentren zudem besonders ortsgenau messen, werden mikroskopische Messungen möglich, die die räumliche und chemische Struktur biologischer oder materialwissenschaftlicher Proben abbilden.

Quantencomputer werden nicht per se mit maximaler Geschwindigkeit rechnen. IQST-Forscher entwickeln Methoden, die den Rechengang beschleunigen sollen, und eine Sprache, die einen flüssigen Informationsaustausch mit diesen Zukunfts-Rechnern ermöglichen soll.

zudem äußerst sensitiv auf elektrische und magnetische Felder reagiert, lässt es sich prinzipiell als Magnetfeldsensor mit einer bislang unerreichten Auflösung im Nanometer-Bereich nutzen. Jörg Wrachtrups Team erforscht Anwendungsbereiche dieses neuen Sensors, die von der Detektion einzelner Spins bis zu bildgebenden Verfahren mit mikroskopischer Auflösung reichen. Denkbar sind auch Nanopartikel aus Diamant, die in den Körper von Patienten injiziert werden können, um mit bislang ungekannter Präzision Daten für diagnostische Zwecke zu sammeln. Auch als hochsensitive Drucksensoren lassen sich die NV-Zentren im Diamant nutzen. Weil Diamanten sehr temperaturbeständig sind, könnten die Sensoren auch im Abgasstrom oder bei der Automobilentwicklung im Zylinder eingesetzt werden. Die Firma Bosch will nun eine kompakte Version eines Prototyps aus Wrachtrups Labor entwickeln.

Für die Grundlagenforschung verwendet der IQST-Forscher Fedor Jelezko von der Universität Ulm die Diamant-Sensoren. Sein Team will die Struktur komplexer Biomoleküle damit entschlüsseln. „Dies geht auch bei Raumtemperatur“, nennt Jelezko einen Vorteil gegenüber anderen Methoden, bei denen die Moleküle bei tiefkalten Temperaturen untersucht werden. „Wir wollen das System für Untersuchungen von Naturprozessen verwenden.“, ergänzt Jelezko. Dabei soll es auch um die Frage gehen, ob Fotosynthese ihre Effizienz

der quantenmechanischen Superposition verdankt. Eine Frage, mit der sich die IQST-Wissenschaftler Susana Huelga und Martin Plenio theoretisch befassen.



Mit winzigen millimetergroßen Diamanten lassen sich magnetische und elektrische Felder Nanometer-genau detektieren.

Das herausstechendste Merkmal von Quantencomputern ist, dass sie wegen der quantenmechanischen Superposition Lösungsmöglichkeiten schwieriger Probleme simultan testen können und dadurch erheblich schneller zum Ergebnis kommen als herkömmliche Computer, die beispielsweise bei einer Datenbanksuche Einträge einzeln prüfen müssen. Aber ein Quantencomputer wird auf geschickte Weise programmiert werden müssen, um seine Eignung zum simultanen Rechnen entfalten zu können.

Sowohl die zu lösende Aufgabe als auch das Ergebnis werden in einem Quantencomputer in Form eines komplexen quantenmechanischen Zustandes seiner Qubits codiert sein – ähnlich, wie in einem heutigen Rechner sowohl Eingabe als auch Ausgabe in Form von Sequenzen aus „0“ und „1“ dargestellt sind. Der Rechengang entspricht also dem Übergang von einem Quantenzustand in den anderen.

Die IQST-Forscher Tommaso Calarco und Simone Montangero von der Universität Ulm erforschen, wie der optimale Übergang von Ausgangszustand zum Endzustand bestimmt werden kann. Mit anderen Worten untersuchen sie, auf welchem Weg ein Quantencomputer am schnellsten vom Start zum Ziel kommt. Dass das keine triviale Aufgabe ist, erläutert Calarco wie folgt: „Ein ungeübter Kellner wird ein Tablett voller Sektgläser gemessenen Schrittes zum Tisch tragen, denn beschleunigt er zu stark, werden die Gläser umkippen. Ein

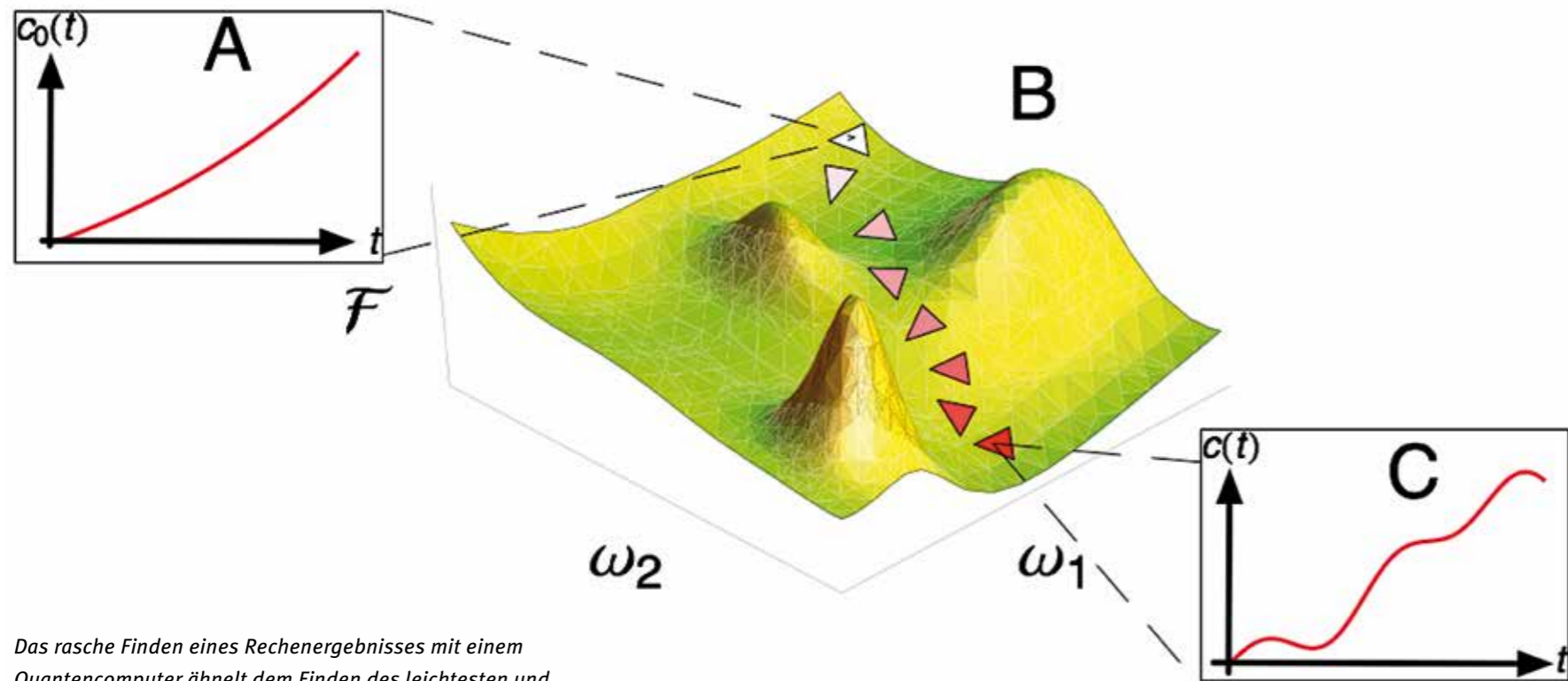
Profi hingegen wird beim Losgehen das Tablett gekonnt schräg halten und es dann während des Gehens wieder waagrecht. So gleicht er geschickt die Kräfte aus, die auf die Gläser wirken. Er wird deutlich schneller am Tisch des Gastes ankommen.“

Der Kellner lerne aus Erfahrung, wie er das Tablett bewegen muss. Auch der optimale Rechenweg des Quantencomputers lasse sich kaum berechnen. Calarco und Montangero haben eine Methodik entwickelt, wie der optimale Weg dennoch schnell zu finden ist. Diese arbeitet ähnlich wie ein Kellner, der durch Probieren herausfindet, wie das Tablett bestmöglich zu neigen ist.

Innerhalb des IQST hat Fedor Jelezko die Methodik bereits genutzt, um eine robuste Kontrolle über das Quantensystem in Diamanten zu erreichen.

Auch Ingenieure interessieren sich für die Methode der IQST-Forscher, denn komplexe technische Problemstellungen verursachen oft einen für die Praxis kaum zu bewältigenden Rechenaufwand. Wenn etwa Kräne ihre Lasten schneller von A nach B bringen sollen, ohne dass die hängende Last ins Schwingen gerät.

Auch das Team des Physikers Martin Plenio von der Universität Ulm entwickelt sozusagen eine Sprache, die eine flüssige Kommunikation mit Quantencomputern ermöglicht. „Mit wachsender Anzahl von Qubits steigt die Zahl der den Quantencomputer beschreibenden



Das rasche Finden eines Rechenergebnisses mit einem Quantencomputer ähnelt dem Finden des leichtesten und schnellsten Weges durch eine Gebirgslandschaft. Tommaso Calarco, Simone Montangero und Kollegen entwickeln Methoden, die diesen optimalen Weg für unterschiedlichste konkrete Problemstellungen ermöglichen.

Variablen ins Unermessliche“, sagt Plenio. Schon bei 14 verschränkten Qubits – der derzeitige Weltrekord – müsste man auf konventionellem Weg 300 Tage lang messen, um den Zustand dieses Quantenregisters in seiner Gänze zu kennen. „Mit unseren Algorithmen kann dieses Auslesen der Daten innerhalb einer Viertelstunde erfolgen“, sagt Plenio. Das Team um Rainer Blatt von der Universität Innsbruck, das den Weltrekord hält, probiere die Methodik derzeit aus.

Mit praxistauglichem Quantencomputing beschäftigen sich auch die theoretischen Physiker um Hans-Peter Büchler von der Universität Stuttgart. Sie verfolgen einen Ansatz, den auch die Forschungsabteilung von Microsoft für vielversprechend hält: den topologischen Quantencomputer. Als Qubits sollen hier nicht die Eigenschaften einzelner Teilchen dienen, sondern kollektive Phänomene sehr vieler Teilchen. Bei Abkühlung ordnen sich z. B. Elektronen in bestimmten Mustern. Daher der Ausdruck topologisch, der vom Griechischen *topos* = Ort, Platz herrührt. „Solche Phänomene sind nicht lokal“, erläutert Büchler, d. h. sie sind nicht auf einen Punkt oder kleinen Bereich beschränkt. Daher, so der Physiker, seien sie auch schwer zu zerstören.

Ein Beispiel sind sogenannte Anyonen, nicht zu verwechseln mit Anionen (negativ geladene Ionen). Diese exotischen Quasiteilchen passen in der Quantenphysik in keine der üblichen zwei

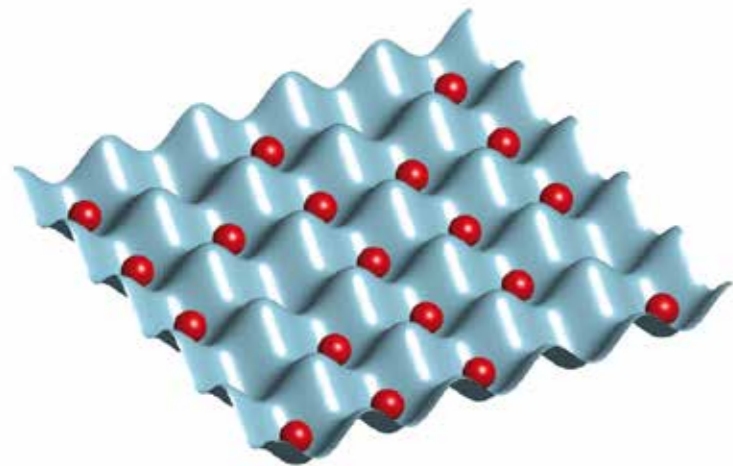
Teilchenkategorien der Bosonen oder Fermionen. Anyonen treten in zweidimensionalen Elektronensystemen auf und verhalten sich wie Teilchen, obwohl sie eigentlich aus dem Zusammenwirken der vielen Elektronen hervorgehen, wie eine Wasserwelle aus der Kooperation sehr vieler Wassermoleküle entsteht. In einer dreidimensionalen Raumzeit (zwei Raumdimensionen + die Dimension der Zeit) laufen die Anyonen auf Bahnen, die an einen geflochtenen Haarzopf erinnern. Diese Bahnen, „Braids“ genannt, sollen ähnlich wie ein Qubit als Träger von Quanteninformation genutzt werden. Die größere Stabilität einer solchen Bahn gegenüber einem Qubit, das mit einem Teilchen realisiert wird, kann man sich wie folgt vorstellen: Um ein Geflecht zu stören, muss man es an einem Punkt auseinanderschneiden und wieder neu zusammenfügen. Das ist schwieriger, als einen Ball (Teilchen) gegen eine Wand zu treten.

Diese Art von Robustheit soll topologische Qubits vor der Dekohärenz schützen. Diese Forschung steht allerdings erst am Anfang.

Das Ballett der Atome

IQST-Forscher entwickeln eine der vielversprechendsten Anwendungen der Quantenphysik: Quantensimulatoren. Mit deren Hilfe lassen sich Modelle von hochkomplexen Materialien erstellen, die bislang sogar Supercomputer überfordern.

An der Universität Stuttgart simulieren Forscher am Institut des kürzlich leider verstorbenen IQST-Mitbegründers Alejandro Muramatsu Systeme aus vielen Teilchen routiniert am Computer und arbeiten dabei mit experimentellen IQST-Forschern zusammen. Mit Johannes Hecker Denschlag von der Universität Ulm zum Beispiel. Dessen Team beherrscht die Kunst, Atome regelmäßig anzuordnen, wie einen Trupp Soldaten, und zu manipulieren. Die Ulmer Forscher fangen die Atome in einem Gitter aus sich überkreuzenden Laserstrahlen wie Eier in einem Eierkarton. „Wir können mit den Atomen spielen“, sagt Hecker Denschlag. Die Forscher kontrollieren die Wechselwirkungen zwischen den Atomen, können sie z. B. zwischen anziehend und abstoßend umschalten. Oder sie erzeugen auf Knopfdruck Paare



von Atomen, also simulierte Moleküle. „Es gibt weltweit nur wenige Forschergruppen, die das beherrschen“, sagt Hecker Denschlag. Mit ihrer Kontrolle über die Atomensembles können die Forscher auch Festkörper simulieren. „Wir arbeiten daran, Graphen zu simulieren und dieses künstliche Graphen unter Bedingungen zu untersuchen, die man mit realem Graphen nicht erreicht“, erläutert Hecker Denschlag. Büchlers Theorieteam aus Stuttgart ergänzt diese Forschung mit Computermodellen des Graphens, die z. B. ausloten, wovon die Leitfähigkeit des Wundermaterials abhängt. Derzeit erschließen sich die IQST-Forscher um Hecker Denschlag ein ganz neues Feld von der Pike auf. Sie gesellen zu den Atomensembles einzelne Ionen. So lassen sich etwa gezielte Verunreinigungen von Festkörpern, sogenannten Dotierungen, untersuchen, die technologisch eine hohe Relevanz besitzen.

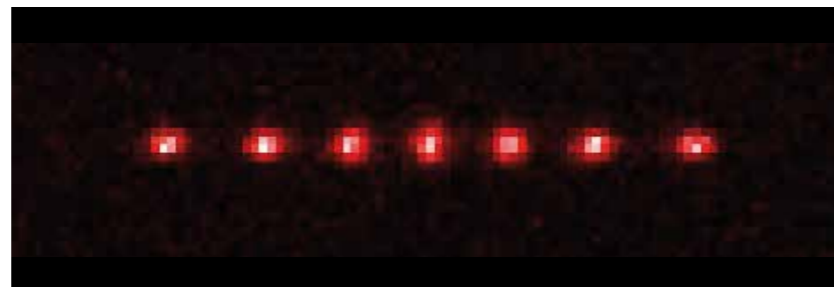
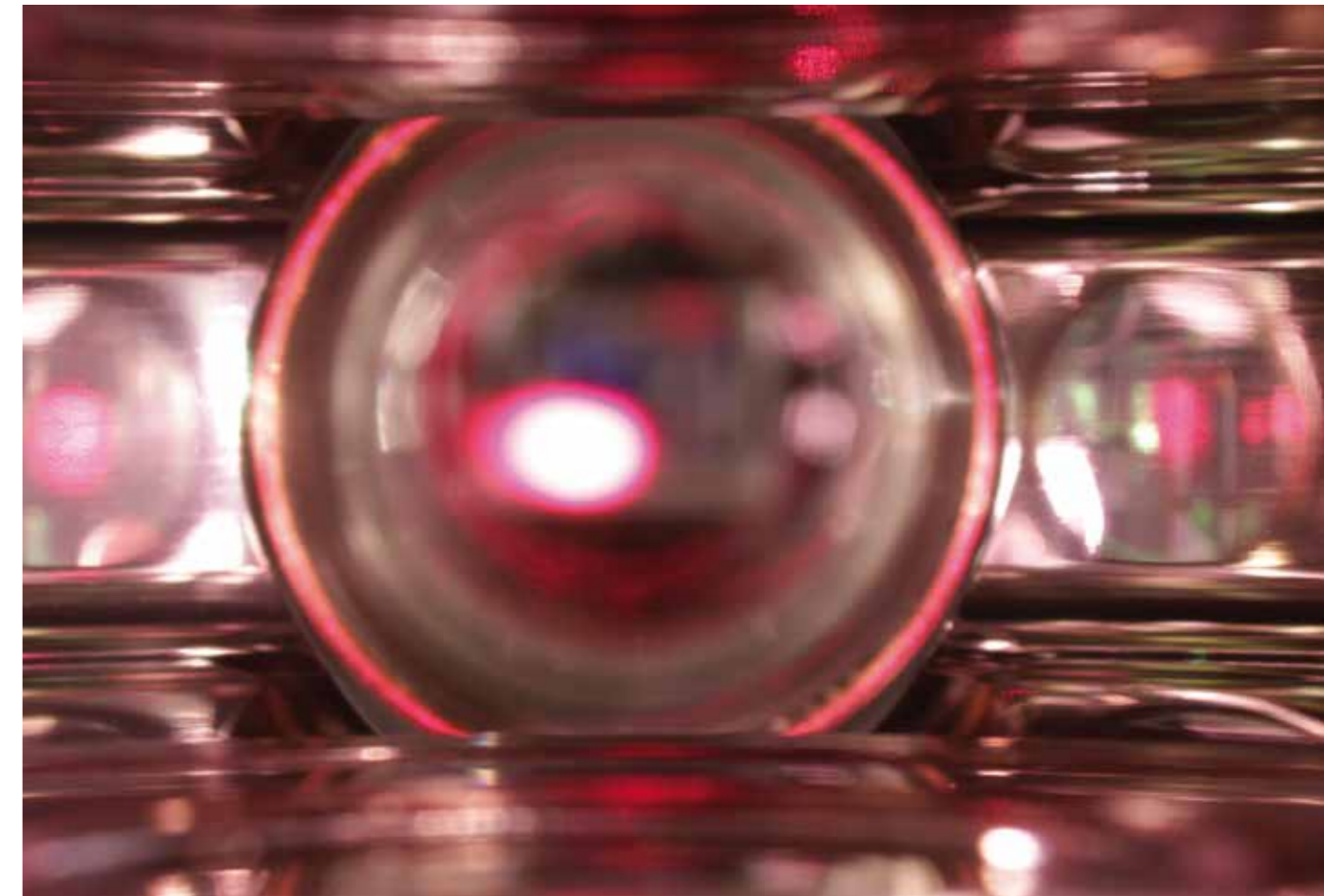


Bild ganz links: Ungeladene (neutrale) Atome, gefangen in einem so genannten optischen Gitter. Es entsteht durch sich gegenseitig durchdringende Laserstrahlen und hält Atome fest, wie ein Eierkarton Eier birgt. So entsteht eine regelmäßige Anordnung von Atomen, ähnlich wie in einem Kristall. Solche künstlichen Kristalle dienen als Modellsysteme zur Untersuchung von Fragestellungen in der Festkörperphysik.

Bild links: Kette von sieben Barium-Ionen in einer linearen Paul-Falle. Ein elektrisches Wechselfeld hält die elektrisch geladenen Ionen fest. Der Abstand zwischen den Ionen beträgt ca. 30-40 Mikrometer (tausendstel Millimeter). Die Ionen werden mithilfe von Laserlicht auf nur 0,5 tausendstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt (-273 °C) abgekühlt.

Bild rechts: Blick in die Vakuumapparatur. Im Zentrum ist eine leuchtende Wolke ultrakalter Lithium-Atome zu sehen, die für die Graphen-Experimente präpariert wird.



Kontrolle über einen Ozean von Elektronen

Supraleiter, die bei Normaltemperaturen Strom verlustfrei leiten, sind der Traum von IQST-Forscher Bernhard Keimer. Doch bevor die dafür nötigen Materialien entwickelt werden können, muss das hochkomplexe Verhalten der Elektronen in Supraleitern verstanden werden.

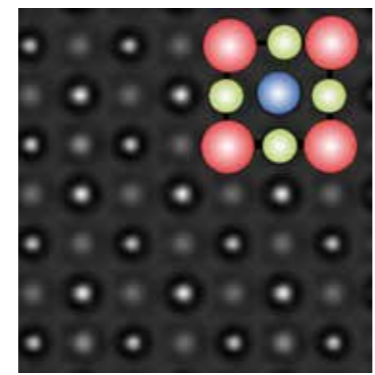
Quantensimulatoren, wie sie Hecker Denschlags Team verwirklicht, gelten in Fachkreisen als eine der vielversprechendsten Anwendungen der Quantenphysik. Denn sie könnten das Verständnis der Hochtemperatur-Supraleiter erleichtern. Hat man die Hochtemperatur-Supraleiter (kurz: HTSL) einmal verstanden, ließen sich möglicherweise Festkörper konstruieren, die Strom bei Raumtemperatur verlustfrei leiten.

Diesem Ziel hat sich auch der IQST-Forscher Bernhard Keimer vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart verschrieben. In Supraleitern besetzen sämtliche Leitungselektronen einen einzigen kohärenten Quantenzustand. Diese Dimension zeigt, wie hochkomplex so ein Quantensystem sein kann: Mehr Elektronen, als es Sandkörner an allen Stränden der Erde gibt, wirken darin zusammen. „Es ist dennoch möglich, diese Komplexität zu erfassen“, sagt Keimer. Dies versucht Keimers Team mit mehreren Ansätzen. Einer davon ist es, in Kooperation mit Chemikern neue Materialien zu synthetisieren, die eine ähnliche Struktur besitzen, wie bekannte HTSL, z. B. Kupferoxid-Verbindungen. Diese Materialien charakterisiert das Team dann. Anschließend versuchen theoretische Quantenwissenschaftler die Daten mithilfe von numerischen Computermodellen zu verstehen. Das kann wiederum wertvolle Hinweise für die Synthese neuer Materialien liefern. Experiment und Theorie spielen sich so die

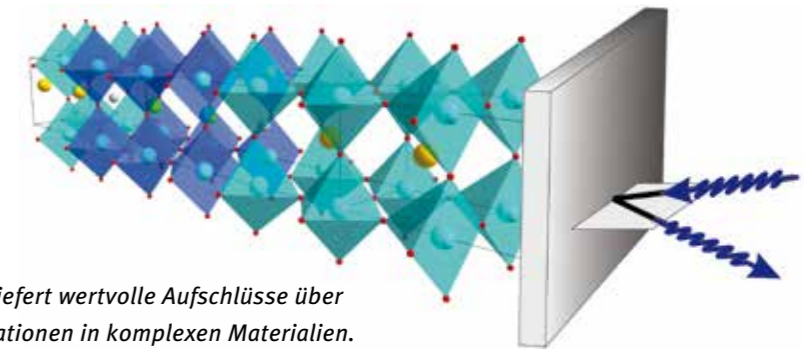
Bälle zu und nähern sich im besten Fall immer mehr einem Rezept für den Raumtemperatur-Supraleiter.

„Noch sind wir weit davon entfernt, neue Hochtemperatur-Supraleiter mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu designen“, räumt Keimer ein. Das langfristige Ziel sei aber, „etwas herzustellen, das man auch verkaufen kann.“

Damit hat Keimer die Motivation vieler IQST-Wissenschaftler umrissen. Sie verbinden ihren Entdeckergeist, ihre Lust am Ausprobieren mit dem Ziel, die neu entdeckten Effekte für die Technologie nutzbar zu machen. Die Praktiker im IQST greifen die Ideen gerne auf. So kann aus Grundlagenforschung Neues entstehen, das zur Lösung globaler Herausforderungen beitragen und den Alltag der Menschen bereichern kann.



Das Bild zeigt die atomare Struktur einer Lanthannickeloxid-Heterostruktur, die in Stuttgart hergestellt und in Ulm mit Elektronenmikroskopie charakterisiert wurde (Kinyanjui et al., Applied Physics Letters 104, 221909 (2014)). Rot = Lanthan, Blau = Nickel, Grün = Sauerstoff.



Probenaufbau zur optischen Untersuchung von Quantenmaterialien.

Die Streuung von Photonen liefert wertvolle Aufschlüsse über elektronische Quantenkorrelationen in komplexen Materialien.



Die Zusammenarbeit der Universitäten Stuttgart, Ulm und dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart ist beispielhaft für Baden-Württemberg und eröffnet durch die Nutzung der Infrastruktur an beiden Standorten neue Perspektiven. Vielfältige Partnerschaften mit international führenden Forschungseinrichtungen in Europa und weltweit stärken die Bedeutung dieses Forschungsverbundes.

18 beteiligte Institute an den Universitäten Stuttgart und Ulm und das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung (Stuttgart)
22 Professoren (Fellows)
750.000 Euro Förderung pro Jahr für 5 Jahre (je 1/3 Universitäten Ulm und Stuttgart, 1/3 Land Baden-Württemberg)

An den Standorten Stuttgart und Ulm gibt es eine besonders hohe Dichte von Expertise und hervorragende Nachwuchswissenschaftler, was durch zahlreiche Wissenschaftspreise und hoch dotierte Förderprogramme belegt ist:

- 4** Leibniz-Preise (Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG)
- 2** Max-Planck-Preise (Max-Planck-Gesellschaft)
- 15** ERC Grants (Europäischer Forschungsrat)
- 3** ERC Synergy Grants (Europäischer Forschungsrat)
- 2** Humboldt-Professoren (Alexander von Humboldt-Stiftung)

4 Wissenschaftler in der Gruppe gehören zu den weltweit am meisten zitierten Wissenschaftlern. (The World's most influential scientific minds, Thomson Reuters).

Im IQST werden mehrere EU-Großprojekte bzw. ein DFG-Schwerpunktprogramm koordiniert. Angestrebt wird eine zunehmende Vernetzung in die europäische Industrie, um den Wissenstransfer von der Forschung in die Wirtschaft stärker voranzutreiben.

Das IQST hat sich zum Ziel gesetzt, durch die interdisziplinäre und über die Grenzen der Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen hinausgehende Zusammenarbeit die Herausforderungen der zweiten Quantenrevolution, d. h. die Nutzbarmachung der Verschränkung von Vielteilchensystemen, anzugehen. Besonders wichtig ist die Umsetzung der neuen Quantentechnologien in Produkte, die für die Gesellschaft von Nutzen sind.

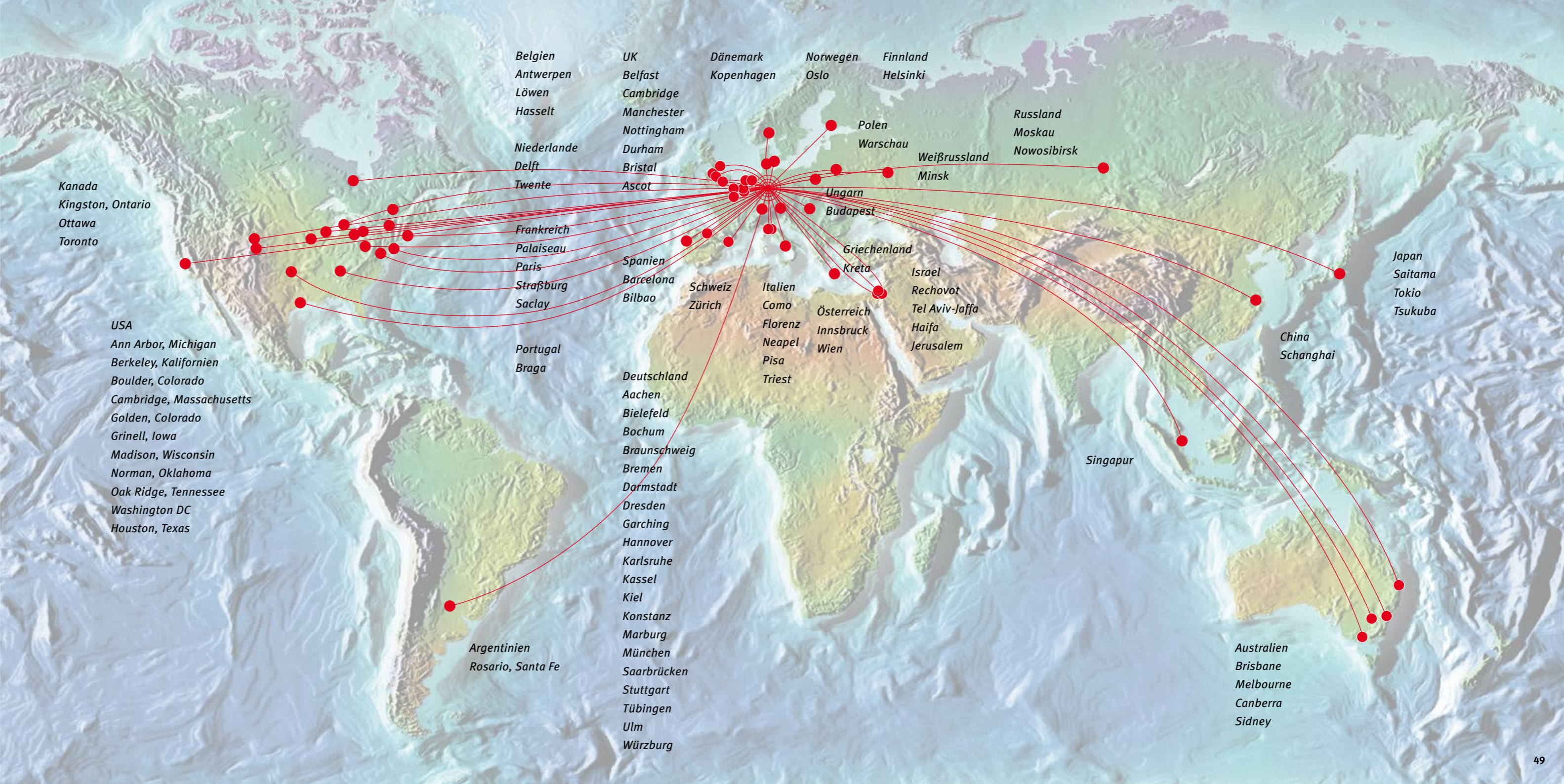
In der regionalen Allianz für Quanteninnovationen, die von den IQST-Forschern Fedor Jelezko (Universität Ulm) und Jörg Wrachtrup (Universität Stuttgart) koordiniert wird, kommt dem Technologietransfer im Rahmen von Kooperationsprojekten mit der Industrie eine herausragende Bedeutung zu. An beiden IQST Standorten entstehen zudem vom Land Baden Württemberg und der Bundesregierung geförderte umfangreiche Neubauten mit hochmodernen Laboren und Infrastrukturen: Auf dem Gelände der Universität Ulm wird für das neu gegründete Zentrum für Quantenbiowissenschaften (ZQB) ein eigener Forschungsbau entstehen und in Stuttgart erhält das Zentrum für Angewandte Quantentechnologien (ZAQuant) einen umfassenden Neubau, in dem u. a. die in Ulm erarbeiteten Erkenntnisse im Bereich der Biologie und Medizin in Prototypen umgesetzt werden sollen.

Das nachhaltige Wachstum des Zentrums wird im Rahmen von weiteren koordinierten Forschungsprogrammen und Netzwerken vorangetrieben. Hierzu werden innerhalb des IQST-Verbundes intensive Vorbereitungen getroffen, um die erforderlichen Rahmenbedingungen zu schaffen.

Ein weiteres erklärtes Ziel des Zentrums ist es, die Internationalisierung von IQST voranzutreiben. Dies soll durch die Einrichtung einer weltweiten Graduiertenschule, mit dem Zentrum in Stuttgart und Ulm und einem regen Austausch von Gastwissenschaftlern z. B. mit der Hebrew University (Israel), der University of British Columbia (Kanada) sowie der University of Tokyo (Japan), ermöglicht werden. Die Graduiertenschule wird von den Grundlagen der Quantenwissenschaften und -technologien bis hin zu Industrieanbindungen umfassend ausgerichtet sein. Die nachhaltige Förderung des internationalen wissenschaftlichen Austausches im IQST wird weiterhin durch den Ausbau des Besucher- und Gastprofessoren-Programmes gestärkt. Alle Maßnahmen dienen auch zur Vorbereitung auf die Exzellenzinitiative 2017.

IQST weltweit vernetzt

In die Projekte, welche im IQST koordiniert und bearbeitet werden, fließen Kooperationen mit einer Vielzahl führender Forschungseinrichtungen rund um den Globus ein. Die Weltkarte zeigt, wie weit gespannt das Netzwerk ist. Alle Mitglieder des Zentrums haben intensive internationale Beziehungen und pflegen weltweite Kollaborationen auf Ihren Forschungsgebieten.



Vorstand



Prof. Dr. Tommaso Calarco, Sprecher IQST
 Universität Ulm
 Institut für Komplexe Quantensysteme
... entwickelt Kontrolltechniken für Mehrkörperprobleme und will so Quantentechnologien leistungsfähiger machen.



Prof. Dr. Tilman Pfau, Sprecher IQST
 Universität Stuttgart
 5. Physikalisches Institut
... erforscht die Wechselwirkung von Atomen in ultrakalten Quantengasen, um kontrolliert neuartige Zustände von Materie zu erzeugen.



Prof. Dr. Joachim Ankerhold
 Universität Ulm
 Institut für Komplexe Quantensysteme
... erforscht die Quantendynamik an Schnittstellen der Festkörperphysik zur Quantenoptik oder Chemie sowie im Grenzbereich zur klassischen Physik.



Prof. Dr.-Ing. Norbert Frühauf
 Universität Stuttgart
 Institut für Großflächige Mikroelektronik
... entwickelt Dünnschichttransistoren, mit denen in Zukunft Bildschirme aus selbstleuchtenden organischen Substanzen, OLEDs, gebaut werden können.



Prof. Dr. Wolfgang Schleich
 Universität Ulm
 Institut für Quantenphysik
... beschäftigt sich mit Fragen der Quantenmechanik und Quantenoptik an den Schnittstellen zu Gravitation und Zahlentheorie.



Prof. Dr. Fedor Jelezko
 Universität Ulm
 Institut für Quantenoptik
... erforscht die Anwendung von Diamant-Quantensensoren, die als hochsensitive Quanten-Mikroskope die Strukturen und Funktionen einzelner Bio-Moleküle sichtbar machen können.



Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth
 Universität Stuttgart
 Institut für Elektrische und Optische Nachrichtentechnik
... entwickelt schnellste und hochauflösende Digital-Analog-Wandler für die Schnittstelle vom Rechner ins Glasfaser, die das Internet noch schneller machen.



Prof. Dr. Harald Giessen
 Universität Stuttgart
 4. Physikalisches Institut
... konzentriert sich auf die Kombination von Mikro- und Nanooptik, um Festkörper-Quantensysteme zu realisieren, die sich leicht an klassische optische Informationskanäle ankoppeln lassen und Methoden der Plasmonik, Metamaterialien und hochauflösenden 3D-Druck verwenden.



Prof. Dr. Jörg Wrachtrup
 Universität Stuttgart
 3. Physikalisches Institut
... forscht mit Diamanten und versucht deren besondere Eigenschaften und Defekte für die Quanteninformationsverarbeitung zu nutzen.



Prof. Dr. Bernhard Keimer
 Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart
... lotet das technische Anwendungspotenzial von Materialien aus, die aufgrund der Quantennatur ihrer Teilchen außergewöhnliche magnetische Eigenschaften zeigen.



Prof. Dr. Hans-Peter Büchler
 Universität Stuttgart
 Institut für Theoretische Physik III
... ist den exotischen Zuständen der Quantenwelt und ihrer Beschreibung im Rahmen der Quanten-eilchentheorie auf der Spur.



Prof. Dr. Johannes Hecker Denschlag
 Universität Ulm
 Institut für Quantenmaterie
... ist elementaren quantenchemischen Prozessen bei der Molekülbindung auf der Spur und versucht neue Methoden daraus abzuleiten.

Fellows

Fellows



Prof. Dr. Susana F. Huelga
Universität Ulm
Institut für Theoretische Physik
... erforscht offene Quantensysteme für Anwendungen in den Quantentechnologien.



Prof. Dr. Jens Michaelis
Universität Ulm
Institut für Biophysik
... erforscht die Bewegung und Dynamik einzelner Proteine zum mechanistischen Verständnis wichtiger molekularer biologischer Prozesse.



Prof. Dr. Alejandro Muramatsu † 2015
Universität Stuttgart
Institut für Theoretische Physik III
... berechnete die komplexe Welt der Vielteilchensysteme für neue Quantenmaterialien.



Prof. Dr. Joris van Slageren
Universität Stuttgart
Institut für Physikalische Chemie
... erforscht molekulare Nanomagnete, insbesondere deren Anwendung als molekulare Quantenbits.

Prof. Dr. Ute Kaiser
Universität Ulm



Zentrale Einrichtung Materialwissenschaftliche Elektronenmikroskopie
... forscht auf dem Gebiet der atomaren und molekularen Abbildung von Defektzentren in Diamant-Quantensensoren und in Bio-Molekülen mit Hilfe aberrationskorrigierter Niederspannungselektronenmikroskopie.

Prof. Dr. Peter Michler



Universität Stuttgart, Institut für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen
... forscht an Halbleiter-Nanostrukturen, um deren Potential für neuartige Lichtquellen wie z. B. Einzelphotonenquellen und Quellen für verschränkte Photonen auszuloten.

Prof. Dr. Martin Plenio
Universität Ulm



Institut für Theoretische Physik
... erforscht Quanteninformation und Quantentechnologien sowie deren Konsequenzen und Anwendungen in Biologie und Medizin.

Prof. Dr. Karsten Urban
Universität Ulm



Institut für Numerische Mathematik
... beschäftigt sich mit der numerischen Lösung und Simulation von Partiellen Differentialgleichungen, mit wissenschaftlichem Rechnen und forscht außerdem auf dem Gebiet Reduzierte Basis-Methoden.



Prof. Dr. Alexander Kubanek
Universität Ulm
Institut für Quantenoptik
... entwickelt nichtklassische Lichtquellen für Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung und in der Sensorik.



Prof. Dr. Simone Montangero
Universität Ulm
Institut für Komplexe Quantensysteme
... wendet leistungsstarke numerische Methoden an, um Vielteilchensysteme zu untersuchen und für neue Quantentechnologien zu nutzen.



Prof. Dr. Jörg Schulze
Universität Stuttgart
Institut für Halbleitertechnik
... bringt die Quantenwelt mit ihren neuen Materialien, Effekten und Konzepten in die vom Silizium dominierte Mikroelektronik.

Glossar

*„I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics“
Richard Feynman, Nobelpreis 1965*

Atomorbital
Elektronen bewegen sich nicht auf festen Bahnen um den Kern. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit halten sie sich in definierten Bereichen um den Atomkern herum auf. Das wolkenförmige Gebilde eines Atomorbitals veranschaulicht die Wahrscheinlichkeiten für jeden möglichen Aufenthaltsort. Die Orbitale werden durch die Wellenfunktion des Elektrons exakt bestimmt.

Bit
Kleinstmögliche Einheit der Information. Sie wird meist durch die beiden Werte „0“ und „1“ dargestellt.

Photon
Licht besteht aus Myriaden von masselosen Teilchen, die auch Photonen genannt werden. Jedes Photon hat eine bestimmte Farbe, die über die Wellenlänge bestimmt ist. Obwohl sie keine Masse haben, können Photonen, wenn sie auf Materie treffen, diese durch ihren Impuls in Bewegung versetzen. Photonen geben sich also je nach Situation als Welle oder Teilchen zu erkennen. Photonen stoßen nie mit anderen Photonen zusammen. Sie sehen sich untereinander nicht. Ein einzelnes Photon zu isolieren oder zu erzeugen, ist eine experimentelle Herausforderung.

Quantenkryptografie
Die Verwendung von Effekten der Quantenphysik für neuartige Verschlüsselungsverfahren. So lässt sich dank der Superposition eine Verbindung zwischen Sender und Empfänger aufbauen, bei der jeder Lauschangriff zwangsläufig bemerkt wird.

Quantencomputer
Ein Rechner, der Quanteninformation verarbeitet. Dank Superposition und Verschränkung kann er viele Lösungsmöglichkeiten eines Problems gleichzeitig testen und so schneller zum Ergebnis kommen als ein herkömmlicher Computer. Allerdings funktioniert das nicht für jede Art von Rechnung. Der Quantencomputer wird deshalb vermutlich nicht als Universalrechner (wie es heutige Computer sind) eingesetzt werden.

Quantendot
Ein winziges Halbleiterstück (wenige Nanometer Durchmesser), das von einer Schale aus einem anderen Halbleitermaterial umgeben ist, vergleichbar mit einem Kirschkern und dem ihn umgebenden Fruchtfleisch. Der innere Halbleiter bildet, ähnlich einem Atom, diskrete Energieniveaus für Elektronen aus. Deshalb gelten Quantendots auch als „künstliche Atome“. In der Quantentechnologie sollen sie als

miniaturisierte Quellen für einzelne Photonen genutzt werden, wie sie etwa für die Quantenkryptografie interessant sind.

Quanteninformation
Information, die in einem quantenphysikalischen System gespeichert ist. Solche Information lässt sich nicht mit den Gesetzen der klassischen Informationstheorie beschreiben. Sie bildet die Basis von Anwendungen wie dem Quantencomputer oder der Quantenkryptografie. Die Einheit der Quanteninformation ist das Qubit/Quantenbit.

Quantenkohärenz
Eine Beziehung zwischen den Teilen eines Quantensystems. Ohne sie können z. B. die Qubits in einem Quantencomputer keine Berechnungen ausführen. Vergleichbar ist Quantenkohärenz mit der Interferenzfähigkeit von Lichtstrahlen: Nur wenn die Phasen zweier Lichtwellen eine feste und zeitlich konstante Beziehung zueinander haben, können sich die beiden Wellen konstruktiv oder destruktiv überlagern.

Kohärenzzeit
Die Zeitdauer, für die die Quantenkohärenz aufrecht erhalten wird. Nur innerhalb der Kohärenzzeit sind Berechnungen auf einem Quantencomputer möglich. Einzelne Rechenschritte sollten daher nur

winzige Bruchteile der ohnehin meist kurzen Kohärenzzeit dauern, damit komplexere Aufgaben lösbar werden. Die Kohärenzzeit variiert für verschiedene Arten von Qubits zwischen wenigen Millionstel Sekunden bis hin zu mehreren Sekunden.

Qubit (Quantenbit)
Kleinste Speichereinheit für Quanteninformation. Es wird realisiert durch Zweizustands-Quantensysteme, z. B. zwei Polarisationsrichtungen von Photonen. Im Unterschied zum klassischen Bit, das entweder den Wert 0 oder den Wert 1 annehmen kann, kann ein Qubit „Mischungen“ der Werte 0 und 1 speichern, also z. B. 70 % „0“ und 30 % „1“. Es kann also unendlich viele Werte annehmen. Diese Fähigkeit der Parallelverarbeitung von zwei diametralen Informationseinheiten liegt dem potenziellen Leistungsvermögen von Quantencomputern zugrunde.

Spin
Der englische Ausdruck für „Drehung“ oder „Drall“. Gemeint ist eine Art Kreiselbewegung von Teilchen, deren Drehrichtung sich von außen mit Magnetfeldern oder Laserpulsen gezielt steuern lässt. Der Spin von Elektronen hat zum Beispiel nur zwei Drehrichtungen und kann daher gut zur Verarbeitung oder als Träger von

Quanteninformation in Form von Quantenbits dienen, Spin nach oben = 1 und Spin nach unten = 0.

Superposition

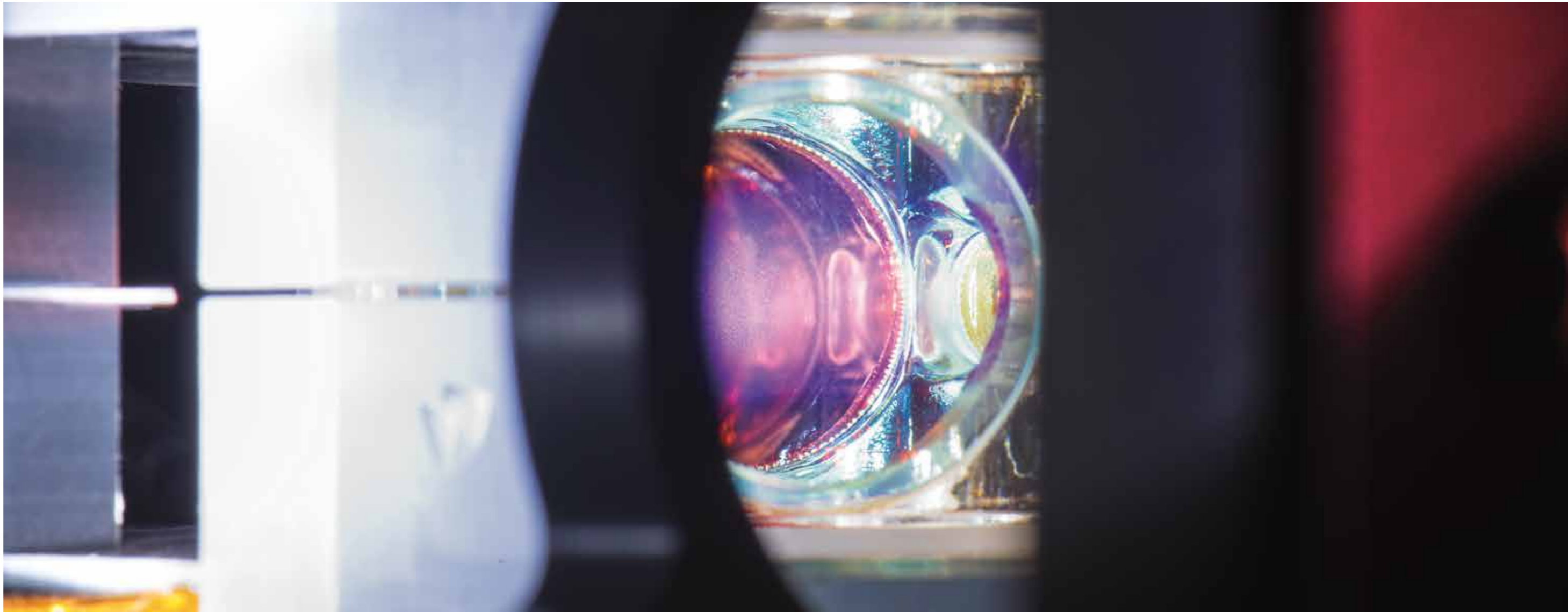
Ein Teilchen oder irgendein anderes Quantensystem, z. B. die Elektronen in einem Supraleiter, existiert simultan in all seinen physikalisch möglichen Zuständen. Erst die Messung einer Größe, z. B. der Aufenthaltsort, greift aus allen möglichen Zuständen einen bestimmten heraus. Die Auswahl erfolgt dabei rein zufällig.

Supraleitung

Bewegen sich Elektronen durch einen Leiter, werden sie durch Reibungseffekte abgebremst. Kühlt man spezielle Materialien zu sehr niedrigen Temperaturen ab, bewegen sich Elektronen paarweise ohne Reibung durchs System.

Verschränkung

Teilchen können nach den Regeln der Quantenphysik so eng miteinander verbunden sein, dass eine Messung an einem Teilchen den Zustand des anderen sofort beeinflusst, auch wenn der Abstand der beiden Partikel sehr groß ist. Nachgewiesen ist dieser Effekt bereits für Photonen, die 150 km voneinander entfernt sind.



Impressum und Bildnachweise

Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919. Aus dem Expeditionsbericht Arthur Eddingtons zum Nachweis der von Albert Einstein vorhergesagten Lichtkrümmung um die Sonne.

Herausgeber:

Zentrum für Quantenwissenschaft und -technologie IQST
c/o Universität Ulm
Institut für komplexe Quantensysteme
Prof. Dr. Tommaso Calarco
Albert-Einstein-Allee 11
89081 Ulm

c/o Universität Stuttgart
5. Physikalisches Institut
Prof. Dr. Tilman Pfau
Pfaffenwaldring 57
70569 Stuttgart

Text:

Christian J. Meier, Darmstadt

Gestaltung, Layout und Satz:

Zimmermann Visuelle Kommunikation, Stuttgart

Übersetzung:

Teresa Gehrs, LinguaConnect, Osnabrück

Korrektorat:

ARS Armin Schüler, Waiblingen

Abbildungen:

Wolfram Scheible (Titelbild, 6, 7, 11, 22, 27, 35, 37, 57)
Universität Stuttgart (4, 10, 15, 16, 20, 21, 24, 25, 29, 31, 33, 50-53)
A. W. Chin (13)
Max Kovalenko (23)
Universität Ulm (4, 5, 14, 38, 40, 42, 43, 50-53)
Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart (5, 44, 45, 50)
Stuttgart-Marketing GmbH (9)
Pixabay (9)
Wikipedia (Public Domain) (2, 59)
Zimmermann Visuelle Kommunikation (48)

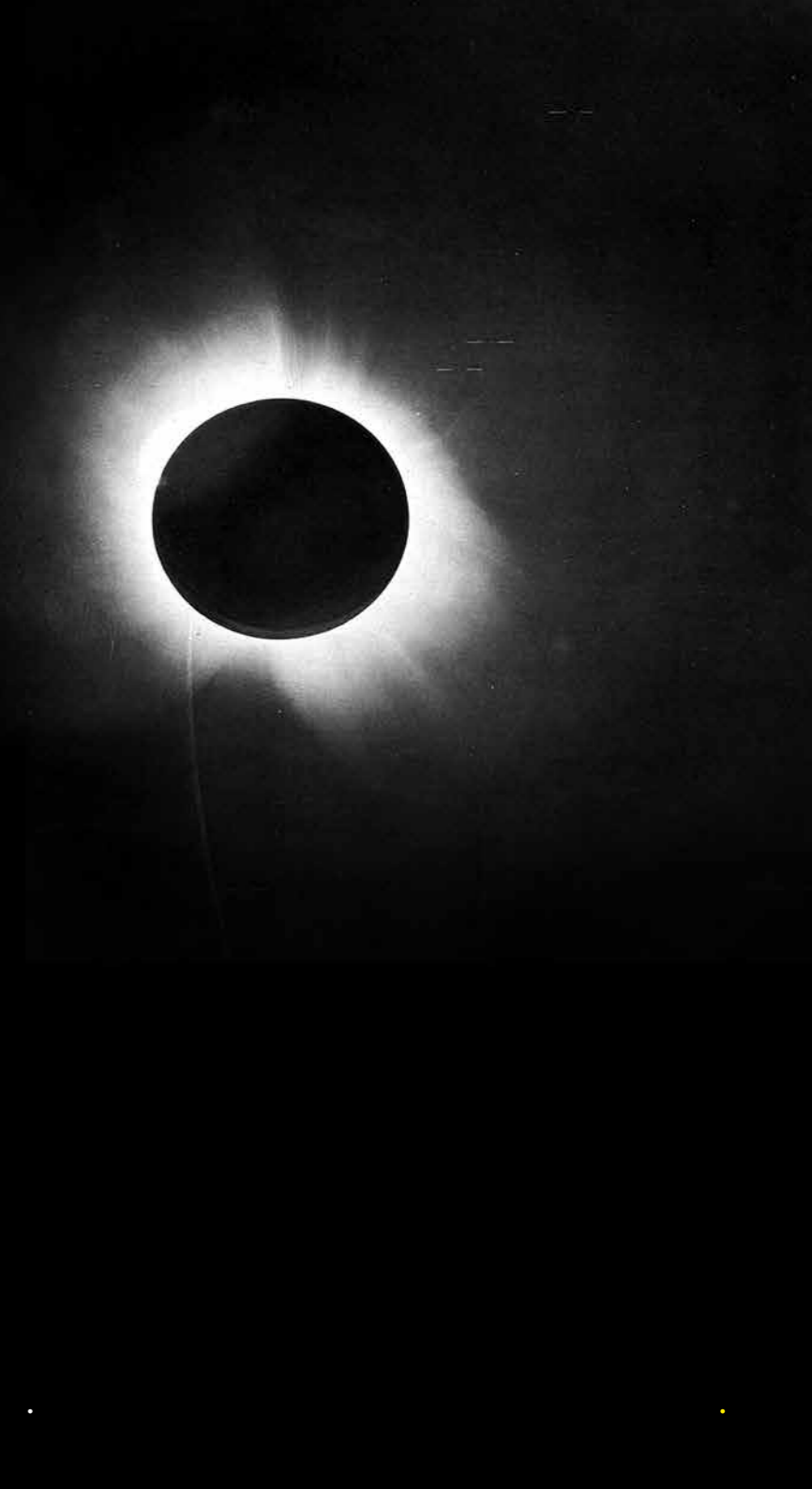
Druck:

Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG, Stuttgart

Auflage:

2.000 Exemplare (Deutsch und Englisch)

© Dezember 2015, IQST Ulm und Stuttgart



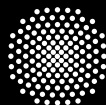
Wolfgang Pauli Niels Bohr Paul Dirac
Max Planck Richard Feynman Louis
de Broglie Norman Ramsey Willis
Lamb Otto Stern Werner Heisenberg
Walther Gerlach Ernest Rutherford
Satyendranath Bose Max Born Erwin
Schrödinger Eugene Wigner Arnold
Sommerfeld Julian Schwinger David
Bohm Enrico Fermi Albert Einstein
Landau Alfred Kastler Victor Weisskopf

www.iqst.org



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST



Universität Stuttgart



ulm university

universität

uulm



Max-Planck-Institut
für Festkörperforschung