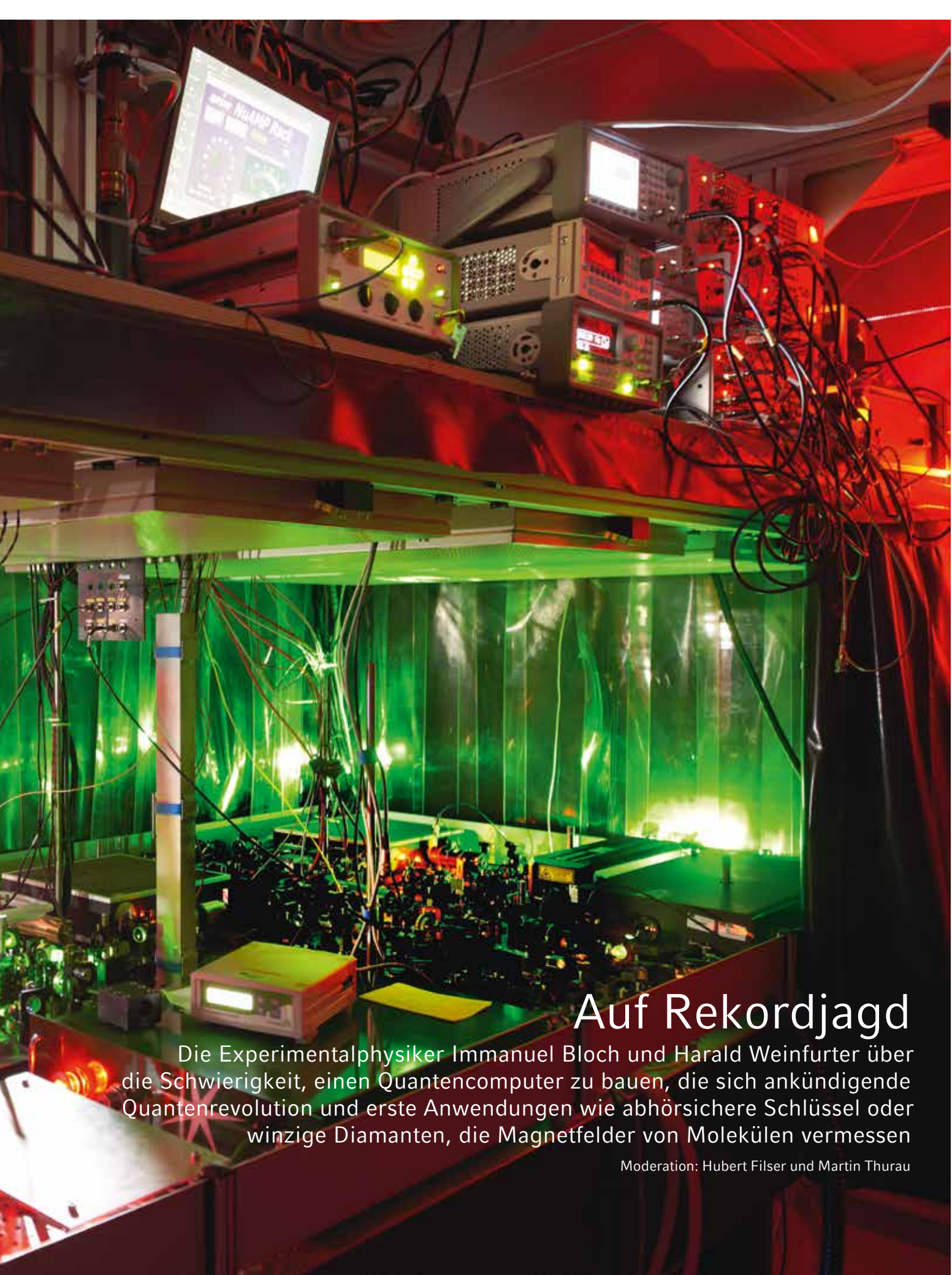


Die Grenzen ausloten: Quantenforschung in den Laboren von Immanuel Bloch. Foto: Jan Greune



# Auf Rekordjagd

Die Experimentalphysiker Immanuel Bloch und Harald Weinfurter über die Schwierigkeit, einen Quantencomputer zu bauen, die sich ankündigende Quantenrevolution und erste Anwendungen wie abhörsichere Schlüssel oder winzige Diamanten, die Magnetfelder von Molekülen vermessen

Moderation: Hubert Filser und Martin Thurnau

Alle reden vom Quantencomputer und von einer Revolution. Spüren Sie eine Aufbruchsstimmung wie die Pioniere der Computerisierung damals, als sie in Wohnzimmern und Garagen die ersten Rechner zusammenlöteten?

**Bloch:** Na ja, die Pioniere damals waren eigentlich schon einen Schritt weiter. Sie hatten ja schon die einzelnen Bausteine, Transistoren und Chips, und konnten daraus Computer bauen. Wir sind noch eine Stufe davor, wir arbeiten, wenn Sie so wollen, an den ersten kleinen integrierten Schaltkreisen.

So bescheiden? Wie weit ist denn die Entwicklung tatsächlich?

**Weinfurter:** Es gibt erste Rechner mit 60 bis 70 Quantenbits, abgekürzt Qubits. Das sind die elementaren Recheneinheiten eines Quantencomputers, der ja auf einer neuen Form von Informationsverarbeitung beruht. Anders als ein Transistor kann ein Qubit die Zustände 0 und 1 simultan speichern. Dann werden Rechenoperationen nicht nacheinander, sondern parallel ausgeführt.

Was kann man damit machen?

**Weinfurter:** Was herkömmliche Anwendungen angeht, nichts, was man mit einem normalen Notebook nicht auch hinbrächte. Durch sogenannte Superposition der Qubits, Überlagerungszustände also, entsteht aber ein hochdimensionaler Raum. So lassen sich spezielle Dinge simulieren, die man selbst mit Supercomputern nicht mehr darstellen könnte, Quantensysteme mit mehr als 50 oder 60 Atomen in einem Festkörper zum Beispiel.

**Bloch:** Wir sind für Quantensimulatoren wie auch für Quantencomputer an einem Wendepunkt – für spezielle Fragestellungen wohl gemerkt. Ein universeller Quantencomputer, der auch eine automatische Fehlerkorrektur gegen Störeinflüsse hat, liegt noch in sehr weiter Ferne. Um den zu realisieren, bräuchten wir Millionen von Qubits. Die aktuellen

60-Qubit-Systeme werden wir aber für ein paar interessante wissenschaftliche Anwendungen nutzen können, etwa um Phänomene des Magnetismus zu untersuchen, um nur ein Beispiel zu nennen.

Wie muss man sich denn einen Quantencomputer mit 60 Qubits vorstellen? Ist das ein Fußballfeld voller Linsen, Laser und Kühlaggregate?

**Bloch:** Das Design hängt von der Plattform ab, die Sie verwenden. Es gibt aktuell mehrere interessante Plattformen, zum Beispiel eine aus Atomen oder Ionenfallen, wie wir sie an meinem Lehrstuhl verwenden, und ein System mit supraleitenden, künstlich hergestellten Qubits. Bei unserer Plattform gibt es relativ viel Optik drum herum. Das fällt beim supraleitenden System weg, hier braucht dafür die Kühlung viel Platz, gerade wenn man es auf Millionen Qubits hochskalieren wollte. Google und IBM setzen sehr stark auf supraleitende Systeme.

Lassen sich denn beide Plattformen miniaturisieren?

**Bloch:** Ja. Das ist vielleicht bei dem supraleitenden Chip ein bisschen besser möglich, weil er mehr mit Elektronik verbunden wird, die wir kennen. Aber das Problem ist auch, dieses System auf Millionen von supraleitende Qubits zu skalieren, dann bräuchte ich beim jetzigen Stand einen Chip so groß wie ein Fußballfeld.

**Weinfurter:** Und man bräuchte einen fußballfeldgroßen Kryostaten zur Kühlung für die Supraleitung. Die Frage der Skalierbarkeit ist zentral. Da ist noch nicht so klar, wer da das Rennen machen wird.

**Bloch:** Jede Plattform hat ihre eigenen Stärken und Probleme. Nehmen Sie etwa die Qualität der Qubits. Supraleitende Qubits muss ich erst mal Bit für Bit bauen, die gibt es in der Natur nicht. Ich muss dabei jedes Qubit exakt gleich machen, jede Ungenauigkeit in der Herstellung schlägt sich sofort in der Ungenauigkeit des Gesamtsystems nieder. Das ist schwer zu kontrollieren.

Ionen und Atome gibt uns die Natur, sie sind alle von Natur aus gleich, da brauche ich mir um diesen Aspekt keine Sorgen mehr zu machen. Dafür habe ich andere Komplikationen.

Sie selbst arbeiten mit Atomen und Ionen. Spüren Sie schon den Wettbewerb zwischen

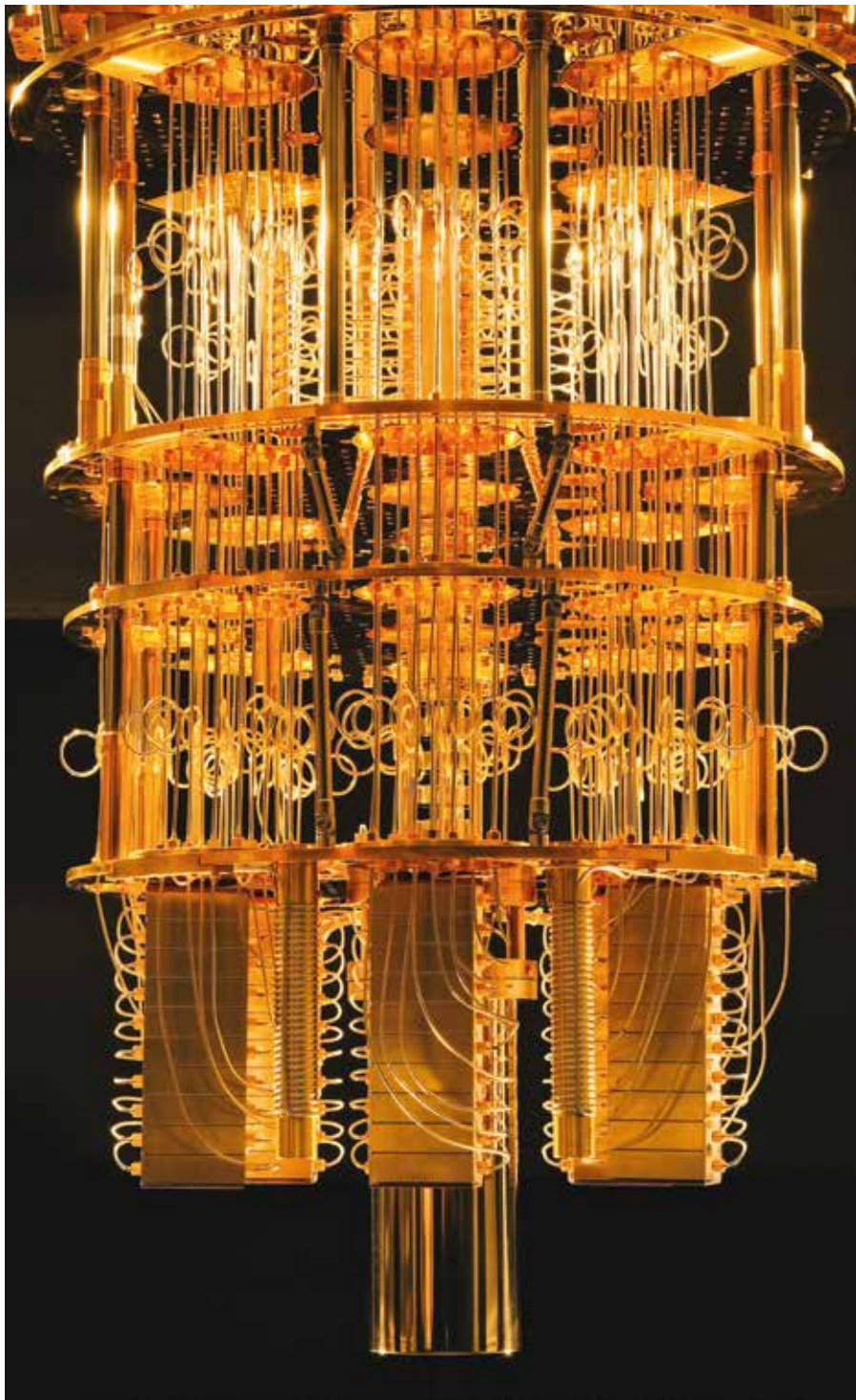
## Auf Konferenzen schnell weg von jedem Hype

den Entwicklern der unterschiedlichen Plattformen?

**Bloch:** Ja sicher, auf Konferenzen müssen wir zeigen, was unsere Plattform wirklich ausrechnen und auf wissenschaftlicher Ebene erreichen kann. Da ist man schnell weg von jedem Marketinghype. Oft ist die Diskrepanz zwischen dem Marktgeschrei und dem tatsächlich Erreichten gewaltig. Aber ich will die Erfolge gar nicht kleinreden, ich finde die bisherigen Fortschritte wahnsinnig beeindruckend.

**Weinfurter:** Sie dürfen nicht vergessen: Vor 40 Jahren wurde zum Beispiel bei der Produktion von Fernsehern noch jeder Transistor einzeln aufgelötet. Da waren keine Mikroprozessoren drin. Die Systeme haben sich immer erst dann schnell weiterentwickelt, wenn eine Technologie sich durchsetzen konnte. So weit sind wir bei den Quantencomputern noch nicht. Trotzdem ist der Hype gerade groß – eine merkwürdige Situation.

Wie positioniert sich der neue Münchner Exzellenzcluster in diesem Wettrennen? Das Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) will ja führend sein bei der zweiten Quantenrevolution. So jedenfalls heißt es im Antrag.



Das Rennen ist eröffnet: Große Unternehmen wie Google und IBM mit ihren Ressourcen haben Vorteile bei der Kommerzialisierung, sagt Immanuel Bloch: IBM-Quantencomputer in der Entwicklung, Yorktown Heights, USA, 2018. Foto: Science Photo Library/IBM Research

**Bloch:** Als einziges Zentrum in Deutschland sind wir in allen Bereichen tätig, die die Kernsäulen in den Quantentechnologien ausmachen, ob nun in der Quantensimulation, beim Computing, in Kommunikation oder Metrologie und Sensorik. Natürlich kommen wir meist aus der Grundlagenforschung. Aber die Arbeit von Harald Weinfurter ist ein gutes Beispiel, wie die Entwicklung der Quantenkommunikation bereits in konkrete Technologieumsetzung mündet. Ansonsten wollen wir eher die Speerspitze sein, wollen Grenzen ausloten – in theoretischen Fragen, bei der Forschung zu Hardware sowie zu Software und Algorithmen. Dafür haben wir hier in München Experten, die zur Weltspitze gehören. Bei der Kommerzialisierung haben Firmen wie Google oder IBM große Vorteile, sie haben die entsprechenden Ressourcen. Das fehlt uns in Europa ein bisschen, zumindest im Bereich des Quantencomputing.

Wissenschaftler, die maßgeblich im Cluster mitarbeiten, haben kürzlich eine Arbeit veröffentlicht, darin ging es um sogenannte Übertragungsprotokolle für supraleitende Qubits im Mikrowellenbereich. Sind das die fundamentalen Bausteine, die Grundlagen, von denen Sie sprechen? Wie wichtig sind solche Details für den Fortschritt?

**Weinfurter:** Das ist ein gutes Beispiel. Das ist nicht schon das fertige Protokoll, aber ein wichtiger Entwicklungsschritt. Man hat jetzt ein erstes Konzept, wie zwei Rechner miteinander reden können. Das ist zwar für Mikrowellen entwickelt, man könnte es aber eventuell auf Licht übertragen.

Dafür braucht es auch die nötige Hardware. Aktuell sind die Qubits mit einem 60 Zentimeter langen, supraleitenden Kabel verbunden. Ziel ist es, ein Zehn-Meter-Kabel zu entwickeln. Das klingt banal, aber tatsächlich handelt es sich um einen Meilenstein?

**Bloch:** Ja, wir haben ja über das Problem des Hochskalierens bei supraleitenden Systemen gesprochen. Es gibt keine Kryostaten

in Fußballfeldgröße, die prinzipiell nötig wären. Aber man könnte das Thema lösen, indem man, sagen wir mal, jeweils 200 Qubits in ein Kühlgerät setzt und diese Einheiten mit einem supraleitenden Kabel vernetzt, um einen leistungsfähigeren Gesamtchip zu bekommen. Insofern sind solche Schnittstellen und Protokolle essenziell, das sind Kernbausteine. Vielleicht können wir damit schon Rechner mit 10.000 Qubits bauen.

**Weinfurter:** Und das System ist bereits angelehnt an die klassische Rechnerstruktur.

**Bloch:** Es geht nicht nur um die Rechner, es geht auch um die Quantennetzwerke, auch für die brauchen wir gute Konzepte.

**Weinfurter:** Auf größere Entfernungen werden wir mit Lichtwellen arbeiten. Es wird auch in der Quantenwelt verschiedene Technologien geben, wie bei herkömmlichen Rechnern, bei denen Bits auch in Strom- oder Lichtpulse umgewandelt werden.

Man muss also nicht nur einen Quantencomputer entwickeln, sondern parallel auch das Quanteninternet?

**Weinfurter:** Ja, einfach alles, was es derzeit für die herkömmliche Kommunikation auch gibt. Das ist die Idee. Vielleicht kommen wir irgendwann mal in einen Bereich, in dem die Quanteneinheit, die wir selber nutzen, überschaubar groß ist und die eigentliche Rechenarbeit irgendwo im Hintergrund von größeren Einheiten erledigt wird. Das wäre dann auch nicht anders als heute, wo wir vom ganzen Internet nicht viel mehr sehen als unser Smartphone. Eine simple Google-Abfrage wird auch in fußballfeldgroßen Rechenzentren irgendwo auf der Welt ausgewertet und kommt dann auf unser Smartphone zurück.

**Bloch:** Der ganze Aufwand, auch die Imperfektion der klassischen Systeme wird ja jetzt sozusagen vor dem Nutzer versteckt. Da gibt es viele Software-Protokolle, die vor diesen Imperfektionen schützen. Genau das Gleiche muss man auch für die Quantenwelt entwickeln, das wird nur ungleich schwieriger sein.

Die Möglichkeiten von Quantencomputern sind beschränkt, wie Sie sagen, und doch gibt es Ängste, dass sie bald die heute gängigen Verschlüsselungscodes knacken könnten.

**Weinfurter:** In Zukunft könnten Quantenrechner tatsächlich die aktuellen Public-Key-Systeme knacken. Deshalb arbeiten Experten in der herkömmlichen Kryptographie daran, Methoden zu entwickeln, die gegen mögliche Angriffe von Quantencomputern immun sind. Man nennt das Post-Quanten-Kryptographie.

**Bloch:** Ich finde, Codeknacken wäre eine der langweiligsten Anwendungen für Quantencomputer, nun gut, sie ist vielleicht für die Geheimdienste nützlich. Doch momentan mache ich mir über Quantencomputerangriffe überhaupt keine Sorgen. Da ist die Forschung noch viel zu weit weg, um rele-

## Von der Not eines Handlungsreisenden

vante Systeme zu stellen. Das heißt natürlich nicht, dass es in fünf bis zehn Jahren nicht anders sein könnte. Aber näher liegen womöglich Durchbrüche in der Pharmazutik oder der Quantenchemie. Oder man löst damit das Travelling-Salesman-Problem, den absoluten Testfall der Routenoptimierung. Da geht es sozusagen um die Not eines Handlungsreisenden: Wie muss er seine Route durch verschiedene Zielstädte wählen, um Zeit und Kosten zu sparen? Klingt trivial, doch es ist eine Aufgabe, an der herkömmliche Rechner oft scheitern.

Der europäische Quantenrechner OpenSuperQ soll zunächst auch ein spezielles Problem lösen, nämlich die Struktur von Blausäure-Polymeren berechnen.

**Bloch:** Das ist schon sehr anspruchsvoll. Heute können wir einfache Probleme der Quantenchemie berechnen, man schaut sich zum Beispiel zweiatomige Moleküle und deren Energieniveaus an. Von größeren Molekülen wie Arzneimittelwirkstoffen sind wir derzeit noch meilenweit entfernt. Die Ziele sind ambitioniert, aber noch berechnen wir meist einfache Demonstrationsbeispiele. Spannend sind indes Simulationen, die man aktuell mit klassischen Algorithmen eben nicht mehr in den Griff bekommt. Die mögliche Konkurrenz durch die Quantensimulationen führt aktuell zu einem Wettstreit, der wiederum die Entwicklung klassischer Algorithmen antreibt. Solche Effekte vermisst man oft.

Kann die Quantenkryptographie künftig sichere Schlüssel auf Quantenbasis liefern?

**Weinfurter:** Ja. Die Frage ist immer, wie viel zusätzlichen Aufwand ich treiben will, um einen sicheren Schlüssel zu bekommen. Die Quantenkryptographie ist derzeit nicht so einfach zu handhaben wie Public-Key-Systeme, aber ich denke, sobald sie sich auch auf Glasfaserleitungen oder mit Freiraumoptik gleichzeitig mit der klassischen Kommunikation durchführen lässt, ist der zusätzliche Technologieaufwand auch nicht mehr so viel größer. Quantenkryptographie bietet zum ersten Mal die Möglichkeit, die Sicherheit zu messen, zu bestimmen, wie viele Informationen ein möglicher Abhörer hat.

Das heißt, die Technik ist nicht absolut abhörsicher, man weiß aber, ob man abgehört wurde und kann reagieren?

**Weinfurter:** Es gibt einen Signal-Rausch-Parameter, der Ihnen sagt, wie viel Information ein Abhörer höchstens haben kann. Weiß ich das, kann ich etwa den Schlüssel so weit schrumpfen, dass der Abhörer keinerlei Informationen mehr hat. Das ist der Trick.

Sie arbeiten seit Jahren an diesen sicheren Quantenschlüsseln. Ihre ersten Versuche

waren spektakulär, Sie haben schon 2007 solche Schlüssel zwischen Teneriffa und La Palma über 144 Kilometer ausgetauscht, später zwischen einem Flugzeug in 20 Kilometer Höhe und einer Bodenstation.

**Weinfurter:** Angefangen haben wir mit Versuchen zwischen der Zugspitze und der Karwendelspitze. Das war eine Entfernung von 20 Kilometern – ungefähr die Distanz, wenn Sie mit einem Satelliten kommunizieren wollen. In der Höhe sind die Wetterbedingungen für die Übertragung einfach bes-

## Verbunden über 700 Meter Glasfaser

ser. Das gilt auch für Teneriffa und La Palma, beides Vulkaninseln. Auch dort haben wir über der Wolkengrenze gearbeitet bei trockener Luft und bester Sicht. Mittlerweile könnten wir das aber auch hier in der Stadt recht gut machen.

Geht die Rekordjagd also weiter?

**Weinfurter:** Wir wollen die Grenzen weiter verschieben und zeigen, dass wir so näher an eine Anwendung kommen. Aktuell bauen wir unsere Geräte so klein, dass wir sie in der Hand halten können. Die Optik für den Sender ist ungefähr so zwei, drei Streichhölzer groß. Damit können wir 30 Zentimeter weit senden.

Was ist der nächste Schritt?

**Weinfurter:** Wir wollen nicht nur die Schlüssel austauschen, sondern ein Netzwerk bauen. Das ist viel anspruchsvoller, weil man die Information über bestimmte Quantenzustände mit der sogenannten Quantenteleportation übermitteln möchte und die Verschränkungen der Teilchen über große Entfernungen verteilen muss. Da braucht

man neue Systeme, Quantenrepeater etwa, eine Art Relaisstationen, daran arbeiten wir.

Wie baut man so ein System auf?

**Weinfurter:** Sie brauchen zwei Quantensysteme plus Verbindung dazwischen und müssen eine Verschränkung erzeugen. Wir nehmen zwei Atome, eines hier im Physikgebäude, eines drüben bei der Wirtschaftsfakultät, dazwischen sind 700 Meter Glasfaser. Diese beiden Atome sind miteinander verschränkt.

Wie kann man sich das vorstellen?

**Bloch:** Die Verschränkung ist ein bestimmter quantenmechanischer Zustand, der aber verteilt ist auf zwei Teilchen und diese gewissermaßen verbindet. Das ist für Laien schwer nachvollziehbar, gebe ich zu. Selbst Einstein sprach einst noch von „spukhafter Fernwirkung“. Die Messungen aber, die ich an diesen beiden Teilchen mache, zeigen Korrelationen, die ich mit klassischer Statistik nicht erklären kann.

Auch eine solche Verschränkung über große Abstände herzustellen, ist offenbar nicht trivial.

**Weinfurter:** Ein Atom emittiert ein Photon und das zweite ebenfalls, und dann kombinieren wir die beiden Photonen wie bei der Quantenteleportation. So können wir quasi die Verschränkung zwischen den beiden Atom-Photon-Paaren auf die beiden Atome übertragen. Das ist aber im Moment noch nicht sehr effizient, oft probieren wir es eine Million Mal, bis wir wirklich verschränkte Atome haben.

Und die bleiben dann verschränkt?

**Weinfurter:** Gute Frage. Quantenzustände reagieren empfindlich auf äußere Einflüsse wie Temperatur- oder Druckschwankungen oder Erschütterungen. Dagegen kämpfen wir an.

Die nächste Hürde: Teilchen über die Distanz von 20 Kilometer zwischen der Münch-

ner Innenstadt und Garching zu verschränken. Wie wollen Sie das umsetzen?

**Weinfurter:** Aktuell emittieren wir Photonen bei 780 Nanometern, diese Wellenlänge wird von Glasfaserkabeln stark absorbiert. Aber die Absorption ist bei etwa 1500 Nanometern geringer, diese Wellenlänge verwendet auch die Telekom. Im Mai haben wir daher einen Frequenzkonverter in unser System eingebaut, damit konnten wir eine Verschränkung zwischen Atom und Photon über eine 20-Kilometer-Glasfaserleitung zeigen. Die Glasfaser war dabei noch auf einer großen Spule aufgewickelt bei uns im Labor. Aber so etwas auf 20 Kilometer über Land zu realisieren – so weit sind wir offen gestanden noch lange nicht, wir arbeiten aber daran.

Ist die Entwicklung auf anderen Anwendungsfeldern schon weiter fortgeschritten?

**Bloch:** In der Sensorik. Bei der Quantenkommunikation oder auch bei Quantencomputern schirmt man die Systeme ab. In der Sensorik nutzen wir dagegen aus, dass Quantenzustände so empfindlich auf die

## Messsensoren, so empfindlich, so genau

Umgebung reagieren, und setzen sie für Messungen ein.

Ein Beispiel?

**Bloch:** Wir denken an Sensoren, die Magnetfelder, Beschleunigung oder elektrische Felder mit Genauigkeiten und räumlichen Auflösungen in einer Geschwindigkeit messen können, wie sich das in anderen Systemen nicht realisieren lässt. Dieser Bereich ist gerade auch für Anwendungen sehr vielversprechend.

**Weinfurter:** Wir haben bereits gelernt, einzelne Quantensysteme gut zu kontrollieren. Die Systeme sind winzig und können trotzdem wunderbar ausgelesen werden. Es gibt im Wesentlichen zwei Ansätze. Das eine sind Atome in einem Quantensimulator, das andere sogenannte NV-Zentren, Stickstofffehlstellenkombinationen in einem Diamanten. Bosch entwickelt damit bereits Komponenten für die Magnetometrie.

Wie funktioniert das?

**Weinfurter:** Ein Atom hat ein magnetisches Moment wie eine Kompassnadel. Auch die Fehlstellen, die übrigens Kristallen auch ihre Farben geben, verhalten sich wie ein künstliches Miniatom im Diamanten mit ähnlichen physikalischen Eigenschaften. Die kann man nutzen und Effekte beobachten.

**Bloch:** Derart kleine Diamantkristalle lassen sich relativ gut überall hinbringen, auch an biologische Proben, an denen man sonst nicht so leicht messen kann.

**Weinfurter:** Das sind Diamantkörner von nur 200 Nanometer Größe, Nanokristalle

## Wie künstliche Miniatome im Diamanten

also. Man kann auch mehrere Fehlstellen nah an der Oberfläche über die Fläche verteilen, dann können Sie quasi ähnlich wie mit Kernspinresonanz einzelne Magnetfelder in Molekülen ausmessen. Das könnte ein enorm wichtiges Werkzeug für Chemiker werden.

Sind solche Fortschritte bereits Teil der Quantenrevolution 2.0, von der oft gesprochen wird?

**Bloch:** Hinter der Idee 2.0 steckt eigentlich das Konzept der Verschränkung, dieses

neuen unteilbaren Ganzen, das sich aus elementaren Bausteinen zusammensetzen und mithilfe der Quantenmechanik für verschiedenste Zwecke ausnutzen lässt.

**Weinfurter:** Bis jetzt war es im Wesentlichen wichtig, dass man mit Quantenmechanik gearbeitet hat, um etwa die Funktionsweise eines Transistors zu verstehen und zu verbessern. Aber jetzt können wir wirklich einzelne Quantensysteme manipulieren.

**Bloch:** Der nächste Schritt von der Technologie her ist, von der Arbeit mit einzelnen Quantensystemen weiterzugehen zu verschränkten Systemen. Das ist technologisch ungleich schwieriger. Wenn Sie verschränkte Zustände bauen können, können Sie wesentlich empfindlicher messen als mit unverschränkten Zuständen. Die Herausforderung ist, diese verschränkten Zustände zu erzeugen und vor allem auch für lange Lebensdauern zu erzeugen.

Das Potenzial der Quantentechnologien gilt als riesig. Die Politik fördert, die Industrie investiert, vor allem im Bereich der Quantenrechner: IBM arbeitet mit der Fraunhofer-Gesellschaft zusammen. Google kooperiert mit dem Forschungszentrum Jülich. Die EU startet Flagship-Programme, die Bundesregierung will insgesamt 650 Millionen Euro in die Erforschung von Quantencomputern stecken. Es geht also um enorme Summen.

**Bloch:** Die 650 Millionen Euro vergessen Sie bitte gleich wieder. Tatsächlich vergibt das BMBF bis zu 100 Millionen Euro in den kommenden Jahren zusätzlich für verschiedene Gebiete der Quantentechnologien – das ist nicht so viel Geld. Da kann man keine Quantensprünge erwarten. Und was das Engagement der US-Unternehmen in Deutschland angeht: Google hat, soweit wir wissen, mit dem Forschungszentrum Jülich eine Absichtserklärung unterzeichnet, dass sie Informationen im Bereich des Quantumcomputing austauschen wollen.

**Weinfurter:** Und ob IBM bei Fraunhofer eine Maschine installiert, wird man sehen.

Könnte in München eine Art Quantum Valley entstehen?

**Bloch:** Mit solchen Vergleichen bin ich immer vorsichtig. Aber in der Tat: Der neue Exzellenzcluster ist schon heute ein weltweit bedeutendes Zentrum auf dem Gebiet. München ist international ein wichtiger Player und wir haben hier auch viele interessierte Firmen wie Microsoft und Google,

## Gab es einen entscheidenden Durchbruch?

aber auch viele Firmen aus dem Bereich der Photonik, die eine sehr wichtige Rolle spielen – insgesamt gute Voraussetzungen also. Noch treibt die Forschung die Entwicklung voran. Aber ob wir das wollen oder nicht, es gibt einfach große Spieler mit im Feld – gewinnorientierte Unternehmen, die das Umfeld stark beeinflussen. Wir brauchen auch in Zukunft Instanzen, die sagen: Stimmt das denn überhaupt, was die Firmen über die Leistungsfähigkeit eines bestimmten Geräts behaupten? Vor Kurzem hat Google einen entscheidenden Durchbruch verkündet ...

... und dazu im Fachmagazin *Nature* publiziert.

**Bloch:** Ja. Das Unternehmen hat dort eine Arbeit veröffentlicht und für sich reklamiert, es habe für ein bestimmtes Rechenexempel die Schallmauer durchbrochen, die die herkömmlichen Supercomputer setzen. IBM bestreitet aber gerade, dass dieser Punkt tatsächlich erreicht wurde. Bei solchen Fragen können Universitäten wichtige Referenzpunkte bieten und Standards entwickeln. Außerdem sollten wir uns konkreten Problemen aus verschiedenen Wissenschaftsbereichen zuwenden und testen, wie gut die verschiedenen Quantenmaschinen



„Es kann gut sein, dass der Durchschnittsbürger nie selbst mit einem Quantencomputer interagieren wird. Das ist sogar sehr wahrscheinlich“: Harald Weinfurter (links) und Immanuel Bloch im Gespräch zur Quantenrevolution. Fotos: ole/LMU

wirklich sind. Wo können sie uns helfen und wo nicht? Es ist eine spannende Umgebung für uns Forscher, aber auch für die Industrie.

Sie haben eingangs fast beiläufig gesagt, mit Quantensimulationen, wie Sie sie untersuchen, könne man Phänomene wie den Magnetismus besser verstehen. Das wäre doch eine große Sache ...

**Bloch:** Absolut. Eine der Hauptfragen in der Festkörperphysik ist, wie ist das Sozialverhalten von vielen Teilchen, so nenne ich das immer. Was machen die eigentlich zusammen? Wir kennen zwar die Regeln, nach denen Teilchen miteinander wechselwirken, trotzdem ist oft schwierig vorauszusagen, was viele Teilchen machen, wenn sie nach den Regeln zusammenspielen. Da geht es um Materialeigenschaften, um Magnetismus, um Supraleitfähigkeit.

Wie ist Ihr Ansatz?

**Bloch:** Mit unseren Systemen wollen wir verstehen, wie dieses Wechselspiel funktioniert. Wir können dabei wirklich Atom für Atom an seinem Gitterplatz festhalten, fotografieren und genau sehen, was die einzelnen Teilchen machen. Dieser mikroskopische Einblick eröffnet ganz neue Analy-

semethoden, die uns vielleicht Antworten darauf geben, was ein bestimmtes Verhalten von Materialien begründet.

Findet also die eigentliche Quantenrevolution in der Grundlagenforschung statt und nicht unbedingt beim Quantencomputer?

**Bloch:** Wenn ich als Wissenschaftler Revue passieren lassen, was wir vor 30 Jahren machen konnten und was wir uns heute in diesen Systemen anschauen können, stecken wir tatsächlich mittendrin in einer Revolution. Vor 30 Jahren, als man erstmals mit Lasern Atome gekühlt hat, hätte niemand auch nur ansatzweise gedacht, dass man am Ende damit wirklich Vielteilchensysteme analysieren kann, von der Festkörperphysik bis hin zur Hochenergiephysik. Das Tempo hat sich enorm beschleunigt. Wir nutzen heute Entdeckungen, für die es einmal den Nobelpreis gegeben hat, als kleine Bausteine in unseren Versuchen. Mit Quantensimulatoren können wir auch Theorien testen. Und es kann gut sein, dass Quantencomputer und Quantensimulatoren am Ende den größten Impact in der Wissenschaft selbst haben werden, auch in Biologie und Chemie, und dass der Durchschnittsbürger nie selbst mit einem Quantencomputer interagieren wird. Das ist sogar sehr wahrscheinlich.

#### Prof. Dr. Immanuel Bloch

ist Inhaber eines Lehrstuhls für Experimentalphysik an der LMU und Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Bloch, Jahrgang 1972, studierte Physik an der Universität Bonn. Er wurde an der LMU promoviert und forschte zunächst am MPI für Quantenoptik und an der LMU, bevor er 2003 auf einen Lehrstuhl an der Universität Mainz berufen wurde. 2008 kam er nach München zurück. Immanuel Bloch ist Träger zahlreicher Preise. Unter anderem zeichnete ihn die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit dem renommierten Leibnizpreis aus, der Europäische Forschungsrat (ERC) erkannte ihm einen seiner hochdotierten Grants zu. Bloch ist einer der drei Sprecher des Exzellenzclusters Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST).

#### Prof. Dr. Harald Weinfurter

ist Professor für Experimentelle Quantenphysik an der LMU. Weinfurter, Jahrgang 1960, studierte Technische Physik an der Technischen Universität Wien, wo er auch promoviert wurde. Er war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hahn-Meitner-Institut in Berlin und an der Universität Innsbruck, wo er sich auch habilitierte, bevor er 1999 an die LMU kam. Weinfurter wurde unter anderem mit dem Descartes-Preis der Europäischen Kommission und dem Kopernikus-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgezeichnet. Seit 2010 ist er zudem Fellow am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.