

## Die drei von der Quantenphysik

**Jens Eisert, Tobias Osborne und Ulrich Schollwöck sind den Geheimnissen komplexer Quantensysteme auf der Spur**

Fellows 2009/2010

von **Rainer Scharf**

Die Regeln des Spiels sind einfach, doch sein Ablauf kann bisweilen so komplex werden, dass selbst Supercomputer mit der Analyse hoffnungslos überfordert sind. Das Spiel ist die Quantenmechanik und die Spielsteine sind viele mikroskopisch kleine Teilchen, die nach den Gesetzen der Quantenmechanik wechselwirken. Das können die Atome in einem Tisch oder die Elektronen in einem supraleitenden Kristall sein.

Obwohl die Quantenmechanik zur Beschreibung von atomaren und molekularen Vorgängen entwickelt worden war, hat sie sich als universell gültige physikalische Theorie

erwiesen. Sie gilt im Bereich der Nanotechnologie ebenso wie in der Welt der makroskopischen Objekte, auch wenn hier ihre bisweilen bizarren Konsequenzen meist verborgen bleiben.

In den letzten Jahren hat sich ein pragmatischer Zugang zur Quantenmechanik entwickelt, der sie mit der Informationstheorie in Beziehung setzt. Dabei geht es zum einen darum, die Eigenschaften von Quantensystemen, die aus vielen Teilchen bestehen, möglichst effizient zu berechnen. Zum anderen will man die Möglichkeiten der Quantenmechanik in neuartigen „Quantencomputern“ nutzen.



Dabei hat es manche Überraschung gegeben. Einige quantenmechanische Vielteilchensysteme ließen sich sehr gut mit Elektronenrechnern analysieren, obwohl deren Arbeitsweise auf den Gesetzen der klassischen Physik beruht. Andere hingegen, die auf den ersten Blick kaum komplexer sind, könnte man nur mit einem Quantencomputer in den Griff bekommen, der das quantenmechanische Spiel perfekt nachspielen würde.

Jens Eisert, Tobias Osborne und Ulrich Schollwöck arbeiten am Schnittpunkt dieser zukunftssträchtigen Entwicklungen in der Quantenphysik. „Wir interessieren uns für verschiedene Aspekte der Quanteninformationstheorie und des Quantencomputings ebenso wie für die Beschreibung komplexer Quantensysteme“, erklärt Jens Eisert, dessen übersprudelnde Begeisterung für sein Arbeitsgebiet sofort ansteckend wirkt. Er hat in Deutschland und in den USA studiert, war am *Imperial College* in London Lecturer und hat jetzt eine Physikprofessur an der *Universität Potsdam* inne.

Die drei Forscher behandeln komplexe Quantensysteme als informationsverarbeitende Aggregate und untersuchen sie mit den Mitteln der Computerwissenschaft. Andererseits führen sie abstrakte Konzepte, die für den Quantencomputer entwickelt wurden, auf konkrete physikalische Probleme zurück, wie sie z. B. bei der Erforschung von supraleitenden Substanzen auftreten. Eine zentrale Rolle spielt in beiden Fällen der Begriff der Information, die es in klassischer und quantenmechanischer Form gibt.

Grundbaustein der klassischen Information ist das Bit, das den Wert „0“ oder „1“ hat. Größere Informationsmengen werden durch Bit-Strings dargestellt, Folgen von Nullen und Einsen wie „0110101...“. Herkömmliche Computer speichern und verarbeiten solche Bit-Strings. „Bei einer Berechnung wird eine Folge von Nullen und Einsen nach bestimmten Regeln in eine andere Folge umgewandelt“, erläutert Tobias Osborne mit leiser Stimme. Mit seiner bedächtigen Art gelingt es ihm, sehr abstrakte Zusammenhänge an konkreten Beispielen verständlich zu machen. Der gebürtige Australier ist nach dem Studium an der *University of Queensland* in Brisbane nach Großbritannien gegangen, war Postdoktorand an der *Bristol University* und ist nun Lecturer an der *Royal Holloway University of London*.

Für die Quanteninformation ist das Quantenbit oder Qubit der Grundbaustein, mit den Basiszuständen (0) oder (1). „Die Quantenmechanik sagt uns, dass ein Qubit noch viel mehr Zustände annehmen kann“, betont Osborne. „Das Qubit kann in einer quantenmechanischen Überlagerung der beiden Basiszustände sein, etwa (0)+(1) oder (0)–(1).“ Dann liegen die Zustände (0) und (1) gleichzeitig vor. In ähnlicher Weise ist Schrödingers Katze im Zustand „(tot)+(lebend)“ zugleich tot und lebendig.

Ein Qubit lässt sich z. B. auf einem Elektron speichern, das sich wie ein winziger magnetischer Kreisel verhält. In einem Magnetfeld kann sein Drehimpuls, der Spin, in Feldrichtung (Zustand (0)) oder ihr entgegen (Zustand (1)) zeigen. Darüber hinaus hat der Spin noch viele ande-

re Orientierungsmöglichkeiten, die unterschiedlich gewichteten Überlagerungen von (0) und (1) entsprechen.

Während alle Formen von klassischer Information gleichwertig sind und ineinander umgewandelt werden können, ist die Quanteninformation davon grundlegend verschieden. Nur in bestimmten Fällen lassen sich klassische Information und Quanteninformation ineinander umwandeln. So überträgt man ein klassisches Bit mit dem Wert „0“ oder „1“ auf ein Qubit, indem man dieses in den Zustand (0) bzw. (1) bringt. Den Zustand des Qubits kann man in diesem Fall durch eine Messung, etwa der Spinrichtung des Elektrons, ermitteln und dadurch das Bit zurückgewinnen.

Befindet sich das Qubit jedoch in einer unbekanntem Überlagerung aus (0) und (1), so lässt sich sein Zustand nicht durch Messung herausfinden. Die Messung ergibt nur ein zufälliges Resultat, entweder (0) oder (1). Da der unbekanntem Überlagerungszustand durch die Messung zerstört wird, geht Quanteninformation bei der Umwandlung in klassische Information unwiederbringlich verloren. „Deshalb ist Quanteninformation etwas Mächtigeres und Leistungsfähigeres als klassische Information“, betont Jens Eisert.

Der Quantencomputer soll die Möglichkeiten nutzen, die die Quantenmechanik für die Informationsverarbeitung eröffnet. Tobias Osborne: „Wie herkömmliche Rechner, so speichert der Quantencomputer die Information mit Hilfe von Teilchen. Um aber die Berechnungen durchzuführen, lässt er die Teilchen in einer Weise

wechselwirken, die auf der Quantenmechanik beruht.“ Dabei verarbeitet er das komplizierte Muster der Qubits, die sich auf den Teilchen befinden, zu neuen Mustern. Weltweit gibt es inzwischen mehrere Prototypen des Quantencomputers. Zur Speicherung der Qubits benutzen sie z. B. isoliert gehaltene Atome oder die Spins von Elektronen.

Noch gibt es keinen leistungsfähigen Quantencomputer, der Hunderte von Qubits verarbeiten kann. Doch Untersuchungen haben gezeigt, dass solch ein Gerät mit dem richtigen „Quantenalgorithmus“ manche Aufgabe wesentlich schneller erledigen könnte als ein Elektronenrechner mit einem herkömmlichen Computerprogramm. Dazu gehört die Zerlegung vielstelliger ganzer Zahlen in Faktoren, wie man sie für spezielle Verschlüsselungsverfahren benötigt. Manche dieser Aufgaben werden überhaupt erst mit einem Quantencomputer lösbar.

Neben den Überlagerungszuständen hält die Quantenphysik noch eine weitere Seltsamkeit bereit, die sich für die Informationsverarbeitung nutzen lässt: die „Verschränkung“. Während man einen einzelnen Elektronenspin in den Überlagerungszustand (0)+(1) bringen kann, können zwei Spins im verschränkten Zustand (0,0)+(1,1) sein. Das entspricht dem makabren Zustand (lebend,lebend) + (tot,tot) zweier Schrödinger-Katzen, die beide leben und zugleich beide tot sind.

„Durch die Verschränkung wird die Quantenmechanik viel komplizierter und auch viel reicher als die klassische Physik“, sagt Ulrich Schollwöck. Er leitet die Gruppe

der drei „Quantenmechaniker“ am *Wissenschaftskolleg* und ist zugleich ihr ruhender Pol. Nach seinem Studium in Deutschland, Großbritannien und Frankreich arbeitete er u. a. in Stuttgart und Aachen. Jetzt hat er eine Physikprofessur an der *Ludwig-Maximilians-Universität* in München und erforscht komplexe quantenmechanische Vielteilchensysteme.

Welche Möglichkeiten eröffnet ihm und seinen beiden Mitarbeitern der Aufenthalt am Wissenschaftskolleg? „Über die physikalische Arbeit hinaus ist es der ständige Kontakt mit Philosophen und anderen Geisteswissenschaftlern, der es uns erlaubt, unsere Fähigkeit zum begrifflichen Arbeiten zu schärfen. Umgekehrt können wir vermitteln, wie sehr sich der konzeptionelle Umgang mit der Quantentheorie in jüngster Zeit weiterentwickelt hat – was außerhalb der Physik nahezu unbemerkt geblieben ist.“

Doch zurück zur quantenmechanischen Verschränkung. Zwei Qubits oder Objekte, die quantenmechanisch verschränkt sind, müssen sich nicht am selben Ort befinden, sondern können z. B. in Berlin bzw. Brisbane sein. Dabei stimmen sie ihr Verhalten über große Entfernungen ab – eine experimentell erwiesene Konsequenz der Quantenphysik, die Albert Einstein nicht mit seinem lokal-realistischen Weltbild in Einklang bringen konnte. Dazu Schollwöck: „Der größte Teil der Information, die in einem Quantensystem steckt, lässt sich nicht mehr lokal fassen, sondern ist über das ganze System verteilt. Wenn wir ein Quantensystem beschreiben, so hängt die Komplexität der

Beschreibung stark vom Grad der nichtlokalen Verschränkung ab.“

Die Überlagerung und Verschränkung einfacher Quantenzustände führt dazu, dass selbst ein überschaubares System aus 1000 Elektronen eine enorme Zahl von Zustandsmöglichkeiten hat, die die Zahl der Atome im Universum bei Weitem übertrifft. Zur Veranschaulichung denkt man sich die möglichen Zustände eines Vielteilchensystems wie Punkte gleichmäßig in einem abstrakten Zustandsraum verteilt. Bringt man das System in einen Anfangszustand, in dem z. B. die Spins der 1000 Elektronen alle in dieselbe Richtung zeigen, so befindet sich das System gewissermaßen in einer Ecke des Zustandsraums. Wie wird es sich entwickeln?

„Die Menge der Quantenzustände, die ein aus wechselwirkenden Teilchen bestehendes Objekt tatsächlich annehmen kann, ist viel, viel kleiner als die Menge aller möglichen Zustände“, erklärt Jens Eisert. „Das Objekt kommt aus seiner kleinen Ecke des riesigen Zustandsraumes nicht heraus. Der Raum aller denkmöglichen Zustände ist ein Artefakt der Quantentheorie. Tatsächlich zieht es die Natur vor, in einer Ecke des Zustandsraumes zu bleiben.“

Jens Eisert hat untersucht, wie sich diese Ecke des Zustandsraumes identifizieren lässt und wie man die dynamische Entwicklung eines Quantensystems in dieser Ecke vereinfacht beschreiben kann. „Wenn man weiß, in welchem Teil eines Heuhaufens die Nadel ist, erleichtert das die Suche sehr.“ Die vereinfachte Beschreibung der Dynamik eines Quantensystems kann



man wiederum dazu nutzen, das Verhalten des Systems mit dem Computer effizienter zu simulieren.

Tobias Osborne erforscht, wie sich Information in einem komplexen Quantensystem ausbreitet. „Stört man einen Teil eines Objekts, so muss sich die Information über diese Störung erst zu einem anderen Teil des Objekts bewegen, bevor sich die Störung dort bemerkbar macht.“ Osborne hat für bestimmte Quantensysteme hergeleitet, wie schnell sich die Information in ihnen ausbreiten kann. Solange unterschiedliche Teile eines Objekts noch keine Information ausgetauscht haben, zerfällt das Objekt in mehrere voneinander unabhängige Bereiche. Dadurch reduziert sich seine Komplexität erheblich.

Unordnung in einem System kann den Informationsaustausch behindern oder ganz unterbinden. Tobias Osborne veranschaulicht das mit einem Stapel von transparenten Folien. Während man durch eine einzelne Folie hindurchsehen kann, ist ein zentimeterdicker Stapel nahezu undurchsichtig und reflektiert das Licht wie ein Spiegel. „Eine einzelne Folie reflektiert vor allem die Lichtwellen, für die die Foliendicke ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. Da im Stapel unterschiedlich dicke Folien zufällig verteilt sind, wird jede Welle früher oder später reflektiert und an der Ausbreitung gehindert.“

Diese „Anderson-Lokalisierung“ tritt auch in einem ungeordneten Quantensystem auf, sagt Osborne. „Sie führt dazu, dass sich die Information nur sehr schwer im System ausbreiten kann. Dann bleiben die verschiede-

nen Teile des Systems weitgehend unabhängig voneinander und das ganze System kann nur einen relativ einfachen Quantenzustand mit geringer Komplexität annehmen.“ Auch in diesem Fall bleibt das Quantensystem in der von Jens Eisert untersuchten Ecke des Zustandsraumes, in der sich sein Verhalten relativ einfach beschreiben lässt.

Für die Arbeit von Ulrich Schollwöck hat das praktische Konsequenzen. Er untersucht Quantensysteme aus dem Bereich der Festkörperphysik. Dazu gehören magnetische Materialien und Hochtemperatursupraleiter, in denen der elektrische Strom widerstandslos fließen kann. „Die Quantensysteme, für die ich mich interessiere, weisen einen besonders hohen Grad von quantenmechanischer Verschränkung auf. Wenn man ihre physikalischen Eigenschaften exakt berechnen wollte, müsste man alle Zustände in einem riesigen und sehr komplizierten Zustandsraum berücksichtigen“, erklärt Schollwöck. Dies ist praktisch unmöglich – aber in vielen Fällen auch unnötig, wenn man sich mit nahezu exakten Resultaten zufriedengibt.

Einige Vielteilchensysteme aus der Festkörperphysik, bei denen die Bewegungen der Elektronen und die Ausrichtung ihrer Spins in komplexer Weise verschränkt sind, verhalten sich längst nicht so kompliziert wie erwartet. Auch sie bleiben in einer winzigen Ecke des riesigen Zustandsraums und sollten sich deshalb vereinfacht beschreiben lassen. „Wir suchen nach effizienten Rechenverfahren, mit denen man die Eigenschaften solcher Systeme bestimmen kann. Dabei zahlen wir den

Preis, dass die Resultate nicht exakt sind. Doch mit entsprechendem Rechenaufwand kann man den Fehler beliebig klein machen.“

So lässt sich das Verhalten von komplexen Quantensystemen oft schon mit heutigen „klassischen“ Computern berechnen, ohne dass man dazu einen Quantencomputer bräuchte. Doch es gibt Grenzen. Manche komplexen Quantensysteme sind so stark eingeschränkt, dass man sie nicht mehr mit klassischen Rechenkünsten in den Griff bekommt. „Solche Systeme sind dann ihrerseits Quantencomputer“, bemerkt Jens Eisert. „In gewisser Weise sind Berechnungen mit Quantencomputern und die effiziente Simulation von Quantensystemen mit klassischen Computern zwei Seiten einer Medaille.“ Was man mit einem herkömmlichen Computer nicht simulieren kann, lässt sich vielleicht als Quantencomputer nutzen.

Auch die Natur selbst spielt nach den Regeln der Quantenmechanik. Auch sie kann die ungeheuren Möglichkeiten, die ihr die Quantenmechanik eröffnet, nur zu einem winzigen Bruchteil ausschöpfen. Kann die Natur mehr als ein entsprechend komplexer Quantencomputer? Ist die Natur selbst letztlich nur ein Quantencomputer? „So weit wollen wir nicht gehen“, meint Ulrich Schollwöck schmunzelnd. „Wir möchten ja die Philosophen am *Wissenschaftskolleg* nicht verärgern.“



