

# Andere Gesetze – neue Anwendungen

## Die Quantenmechanik ermöglicht neue Technologien

Im April hat Professor Daniel Loss, Vizedirektor im SNI, im Rahmen einer feierlichen Zeremonie den König-Faisal-Preis 2017 in der Sparte Wissenschaft verliehen bekommen. Er erhält diese Auszeichnung für seine wegweisenden, theoretischen Arbeiten zur Spinphysik, die unter anderem zur Entwicklung eines Quantencomputers führen können. Bereits 1998 hat Daniel Loss zusammen mit Professor David DiVincenzo vorgeschlagen, den Eigendrehimpuls (Spin) von Elektronen als kleinste Speichereinheit in solch einem Computer der Zukunft zu nutzen und damit Wissenschaftler weltweit inspiriert, auf diesem Gebiet zu forschen. Loss und seine Kollegen machen sich dabei die Gesetze der Quantenwelt zu nutze. Diese Regeln der Nanowelt unterscheiden sich zwar deutlich von den uns aus dem Alltag bekannten, aber sie erlauben ganz neue Anwendungen – nicht nur in der Computertechnologie, sondern beispielsweise auch in der Kommunikationstechnik und in der Sensorik. Verschiedene Teams im SNI-Netzwerk fokussieren ihre Forschung auf diese Bereiche der Quantentechnologie.



Im April bekam Daniel Loss den König-Faisal-Preis für seine wegweisenden, theoretischen Arbeiten zur Spinphysik verliehen.  
(Foto: PRNewsFoto/King Faisal International Prize)

### Andere Gesetze in der Nanowelt

Es gibt verschiedene Konzepte zur Entwicklung eines Quantencomputers – allen ist gemeinsam, dass sie auf den Regeln der Quantenmechanik basieren. Dieser seit rund 80 Jahren existierende Zweig der Physik beschreibt die Eigenschaften und Gesetzmässigkeiten von Materie – also von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen.

In dieser Welt der kleinsten Teilchen herrschen andere Gesetze als sie uns aus dem Alltag bekannt sind. So können sich die beobachteten Objekte in der Quantenwelt wie ein Teilchen oder auch wie eine Welle verhalten. In dem berühmten Doppelspaltexperiment wurde gezeigt, dass ein Elektron, das auf eine Platte mit zwei winzigen Schlitzen trifft, aufgrund seiner Wellennatur gleichzeitig beide Schlitze passieren kann und sich hinter den Schlitzen so ein Interferenzmuster bildet. In der Quantenwelt können sich kleinste Teilchen in einem Überlagerungszustand befinden. Betrachtet man beispielsweise den Eigendrehimpuls (Spin) von Elektronen, der sich wie eine Kompassnadel verhält, bedeutet dies, dass die Richtung des Spins zunächst nicht festgelegt ist und gleichzeitig in verschiedene Richtungen zeigt.

Diese bizarren Eigenschaften zeigen die Teilchen nur, wenn sie sich in einem System befinden, das vor äusseren Einwirkungen geschützt ist. Sobald die Wissenschaftler aber eingreifen und beispielsweise eine Messung vornehmen, steht der Zustand der Teilchen fest – fast so, als wollten die Quanten uns ihre Vielfalt und Variabilität nicht preisgeben.

Aber es wird noch erstaunlicher: Wissenschaftler sind in der Lage, zwei oder mehrere Teilchen miteinander zu verschränken und damit eine neuartige Verbindung

zwischen ihnen zu schaffen. Verschränkte Teilchen sind in ihrem Zustand voneinander abhängig, auch wenn sie nach der Verschränkung räumlich getrennt werden. Schon Einstein studierte dieses Phänomen und beschrieb es als «spukhafte Fernwirkung».

In der uns umgebenden Makrowelt realisieren wir diese skurrilen Regeln der Quantenwelt nicht – wir können diese Phänomene nicht sehen oder erfahren. Aber sie sind vorhanden und regeln das Zusammenspiel von Photonen, Elektronen, Atomen und Molekülen.

### Elektronenspin als Speichereinheit

Daniel Loss und seine Kollegen weltweit versuchen nun die Gesetze der Quantenwelt zu der Erforschung physikalischer Grundlagen und der Entwicklung neuer Technologien zu nutzen. Eines der ambitioniertesten Ziele dabei ist die Entwicklung eines Quantencomputers. In dem von Daniel Loss vorgeschlagenen Konzept für den Quantencomputer sollen die Spins von Elektronen als kleinste Speichereinheit, dem Qubit genutzt werden (analog zu einem Bit (0 oder 1) im digitalen Computer). Die Spins von Elektronen zeigen wie eine Kompassnadel neben den Richtungen unten und oben auch in andere Richtungen – es gibt also bei einem Qubit nicht nur zwei, sondern viele verschiedene Zustände, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorliegen. Erst durch eine Messung wird festgelegt, ob der Spin nach oben oder unten gerichtet ist.

Die Elektronen sind dabei in sogenannten Quantenpunkten im Halbleitern eingefangen. Diese Quantenpunkte sind Nanoobjekt in einem Grössenbericht von 10–100 Nanometern. Sie verhalten sich ähnlich wie Atome, sind jedoch rund 1000 mal grösser. Es können auf ihnen aber 100 Millionen von solchen Elektronen auf einem Quadratcentimeter angeordnet und elektrisch kontrolliert werden. Der Elektronenspin lässt sich mit den Spins benachbarter Elektronen verschränken. Wird der Zustand des einen Spins manipuliert, ändert sich auch der Zustand der verschränkten Spins. Während bei einem digitalen Computer Rechenschritte nur nacheinander ausgeführt werden, können sie aufgrund dieser Phänomene beim Quantencomputer quasi parallel stattfinden und auf einmal abgefragt werden. Ein Quantencomputer wäre damit in der Lage, Berechnungen und Simulationen mit riesigen Datenmengen durchzuführen, die heutige Rechner nicht bewältigen können.

Noch gibt es diesen spin-basierten Computer nicht. Problematisch ist unter anderem, dass Wechselwirkungen mit der Umgebung im Festkörper den Spin eines Elektrons sofort festlegen. Die Gruppe von Professor Dominik Zumbühl vom Departement Physik an der Universität Basel untersucht unter anderem Methoden, diesen als Dekohärenz bezeichneten Vorgang, solange wie möglich heraus zu zögern. «In den letzten Jahren haben meine Kollegen auf diesem Gebiet riesige Fortschritte erzielt», berichtet Daniel Loss im Interview. Während die Kohärenzzeit – also die Zeit, in der die Lebensdauer verschiedener Zustände aufrecht erhalten bleibt – anfänglich nur Milliardstel Sekunden betrug, hält die Gruppe von Dominik Zumbühl jetzt den Weltrekord von einer Minute.

Ein weiteres bisher nicht geklärtes Problem ist die Skalierung der Computer. Um mit einem heutigen Computer konkurrieren zu können, müsste ein Quantencomputer etwa  $10^8$  Spin-Qubits besitzen. Nach den heutigen



In dem von Daniel Loss vorgeschlagenen Konzept für den Quantencomputer sollen die Spins von Elektronen als Speichereinheit genutzt werden.

## Was sind Quanten?

Die Bezeichnung „Quanten“ wird oft für Elementarteilchen, also für nicht weiter teilbare Teilchen, und auch für kleinste übertragbare Energieeinheiten gebraucht. Quanten verhalten sich sowohl als Teilchen wie auch als Welle, sie wechseln ihre Position ohne sich durch den Raum zu bewegen, können Hindernisse auf unsichtbare Weise überwinden und sich an verschiedenen Orten gleichzeitig aufhalten.

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts haben Physiker wie Albert Einstein, Niels Bohr und Erwin Schrödinger die Gesetzmässigkeiten der Quantenwelt definiert. Aber erst im letzten Jahrzehnt ist es möglich geworden, mit einzelnen Quanten zu arbeiten und damit verschiedene Theorien experimentell zu untersuchen und anzuwenden.

Erkenntnissen müsste dabei jedes Qubit mit einem Draht angesteuert werden, was aufgrund des Platzes sehr schwierig ist. Es braucht hier also noch neue Ideen, um den Quantencomputer zu realisieren. Noch ist auch nicht entschieden, mit welchem Material idealerweise gearbeitet wird. Während die meisten Forschungsgruppen weltweit Galliumarsenid (GaAs) untersuchen, baut beispielsweise Intel weiterhin auf Silizium.

Obwohl viele Fragen noch offen sind, ist Daniel Loss nach wie vor davon überzeugt, dass sein Ansatz zum Erfolg führen kann. «Theoretisch erfüllt der spin-basierte Quantencomputer die wichtigsten Voraussetzungen», erklärt er. «Er ist schnell, klein und integrierbar.» Wann aber ein Prototyp zur Verfügung stehen wird, kann auch er nicht vorhersagen.

### **Vielzahl von Anwendungen möglich**

Die Gesetzmässigkeiten der Quantenwelt erlauben nicht nur die Entwicklung neuartiger Computer, sondern werden unter anderem die Datenverschlüsselung sicherer machen, ganz neue elektronische und optische Anwendung ermöglichen und auch die Sensorik revolutionieren.

Verschiedene Arbeitsgruppen vom Departement Physik der Universität Basel, die sich im Netzwerk des SNI engagieren, sind in diesen Bereichen aktiv und arbeiten mit Daniel Loss zusammen. So beschäftigt sich das Team von Professor Richard Warburton mit der Herstellung von Hardware für die Übermittlung von Quanteninformation. Dabei ist es erforderlich einzelne Lichtteilchen senden und empfangen zu können. Die Wissenschaftler arbeiten an einer Quelle für einzelne Lichtteilchen und an einzelnen Spin-Qubits als Speichereinheit, die über Lichtteilchen adressierbar sind. Sie nutzen vor allem Quantenpunkte für ihre Untersuchungen. Diese bereits oben erwähnten Quantenpunkte sind sich selbst organisierende Nanostrukturen aus Halbleitermaterialien, in denen die Ladungsträger in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt sind. Aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu Atomen werden sie auch als künstliche Atome bezeichnet. Ihre Eigenschaften können allerdings mittels einer angelegten Spannung angepasst werden, was sie zu begehrten Untersuchungsobjekten macht. Bei der Arbeit mit Quantenpunkten spielen Quanteneffekte eine wichtige Rolle und ermöglichen neue elektronische und optische Anwendung.

Die Gruppen von Professor Patrick Maletinsky und Argovia-Professor Martino Poggio fokussieren ihre Forschungstätigkeit auf die Entwicklung neuartiger Sensoren. Das Team von Patrick Maletinsky konzentriert sich dabei hauptsächlich auf Stickstoff-Vakanzzentren. In diesen NV-Zentren sitzen einzelne Elektronen, die sich anregen oder manipulieren lassen und auf magnetische oder elektrische Felder reagieren. Auch ihr Spin ändert sich in Abhängigkeit von umgebenden Feldern, was sich recht einfach mittels einer eleganten optischen Messmethode ermitteln lässt. Basierend auf diesen Prinzipien entwickelt das Team von Maletinsky Quanten-Sensoren zur magnetischen Bildgebung auf der Nanoskala und wendet diese auf die Erforschung neuartiger Materialien an. Dieses neuartige quantenbasierte Messprinzip erhöht die Empfindlichkeit und erlaubt es, magnetische Felder abzubilden, die bisher unsichtbar waren.

Im Poggio-Lab liegt der Fokus vor allem auf dem Einsatz von Nano-drähten als Sensoren. Diese winzigen langgestreckten Kristalle, die ein fast fehlerfreies Kristallgitter besitzen, können als robuste Quelle für Quantenlicht eingesetzt werden und sind in der Lage nicht nur die Grösse, sondern auch die Richtung von Kräften zu ermitteln. Sie besitzen ein grosses Potenzial als Sensoren für biologische und chemische Proben und können als Druck- oder Ladungssensor eingesetzt werden.

Die Untersuchung von winzigen Strukturen, von Elektronen oder deren Spin ist aufwendig und die Gesetze, die ihr Zusammenspiel regeln, sind schwierig nachzuvollziehen. Aber sie öffnen die Türen für ganz neue Anwendungen, sodass manchmal auch von einer zweiten Quantenrevolution gesprochen wird. Die erste Quantenrevolution fand vor einigen Jahrzehnten statt als die Gesetze der Quantenmechanik beschrieben wurden. Heute sind Wissenschaftler am SNI und weltweit soweit, diese für neue technologische Neuerungen anzuwenden.