

so etwas wie ein Katalysator, der einen Prozess in Gang setzt und am Ende wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt wird. »Angenommen, man möchte eine Umwandlung beschreiben, etwa den Bau eines Hauses aus Ziegelsteinen«, erläutert Marletto. »Man kann sich eine Reihe verschiedener Maschinen vorstellen, die dies mit unterschiedlicher Genauigkeit bewerkstelligen. All diese Maschinen sind Konstrukteure, die in einem Zyklus arbeiten.« Und sie kehren in ihren ursprünglichen Zustand zurück, wenn das Haus gebaut ist.

Aber nur, weil es eine Maschine zur Durchführung einer bestimmten Aufgabe gibt, heißt das nicht, dass sie diese wieder rückgängig machen kann. Ein Gerät, das ein Haus baut, kann es vielleicht nicht wieder abtragen. Damit unterscheidet sich die Funktionsweise des Konstrukteurs von den dynamischen Gesetzen für die Bewegungen der Ziegelsteine, die umkehrbar sind.

Der Grund für die Irreversibilität, so Marletto, liegt darin, dass ein Konstruktor für die meisten komplexen Aufgaben auf eine bestimmte Umgebung eingestellt ist. Aus dieser benötigt er spezifische Informationen, die für die Erfüllung seines Auftrags wichtig sind. Die umgekehrte Abfolge beginnt jedoch in einer anderen Umgebung, so dass derselbe Konstruktor nicht zwangsläufig funktionieren wird.

Im Februar 2022 hat Marletto zusammen mit ihrem Oxford-Kollegen Vlatko Vedral sowie einem Team vom Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica in Turin gezeigt, dass mit der Konstruktorthorie tatsächlich Prozesse auftreten, die irreversibel sind – obwohl alles nach quantenmechanischen Gesetzen abläuft, die selbst umkehrbar sind. »Wie wir zeigen, gibt es einige Transformationen, für die man einen Konstruktor für die eine Richtung finden kann, aber nicht für die andere«, sagt sie.

Die Forscherinnen und Forscher betrachteten eine Transformation, bei der die Zustände von Quantenbits (Qubits) vorkommen. Sie sind das quantenmechanische Analogon zu den aus der Informatik gewohnten Informationseinheiten, den Bits. Qubits können nicht nur in einem von zwei Zuständen, sondern auch in einer Überlagerung von beiden existieren.

In Marlettos und Vedrals Modell kann ein einzelnes Qubit B von einem bekannten Ausgangszustand B_1 in einen Zielzustand B_2 umgewandelt werden, wenn es sich entlang einer Reihe anderer Qubits bewegt und mit ihnen nacheinander wechselwirkt. Diese Interaktionskette verschränkt die Qubits: Ihre Eigenschaften hängen dann voneinander ab, so dass man ein Qubit nur dann vollständig charakterisieren kann, wenn man zugleich alle anderen betrachtet.

Wenn die Anzahl der Qubits in der Reihe sehr groß wird, lässt sich B beliebig genau in den Zustand B_2 bringen, erklärt Marletto. Der Prozess der aufeinanderfolgenden Wechselwirkungen von B mit der Reihe von Qubits stellt eine konstruktorähnliche Maschine dar, die B_1 in B_2 umwandelt. Im Prinzip kann man den Prozess rückgängig machen und B_2 in B_1 zurückverwandeln, indem man B die gleiche Reihe entlang zurückschickt.



ZERBROCHENES EI Der erste Hauptsatz der Thermodynamik hält das Gesetz der Energieerhaltung fest. Ihm stünde nicht entgegen, wenn ein auf den Boden gefallenes Ei sich wieder zusammenfügen und zurück in die Hand hüpfen würde. Das untersagt jedoch der zweite Hauptsatz.

OKSANA OSTYENKO / GETTY IMAGES / ISTOCK

Was aber, wenn man nach der Umwandlung versucht, mit einem neuen B den Prozess anhand derselben Qubit-Reihe zu wiederholen? Wenn die Anzahl der Qubits in der Reihe nicht sehr groß ist und man den Prozess häufig durchführt, dann gelingt mit diesem Aufbau die Transformation von B_1 nach B_2 immer weniger gut. Entscheidend ist jedoch: Laut den Berechnungen von Marletto und Vedral funktioniert die umgekehrte Umwandlung von B_2 nach B_1 sogar noch schlechter. Dem Team gelang obendrein eine experimentelle Bestätigung dieser Vorhersage. Bei dem Versuch wurde B durch Photonen und eine Reihe von drei Qubits durch einen faseroptischen Schaltkreis simuliert.

Verschränkung zerstreut Informationen

»Man kann den Konstruktor in einer Richtung beliebig gut annähern, aber nicht in der anderen«, resümiert Marletto. Es gibt bei der Transformation also eine Asymmetrie, die dem Prinzip des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ähnelt. Das liegt daran, dass die Transformation das Qubit-System vom Quantenzustand eines einzelnen Teilchens (ein so genannter reiner Zustand) B_1 in einen gemischten Zustand B_2 bringt, der mit den anderen Qubits verschränkt ist.

Ein reiner Zustand ist einer, über den wir alles wissen, was es zu wissen gibt. Wenn aber zwei Objekte verschränkt sind, kann man das eine nicht vollständig charakterisieren, ohne auch das andere entsprechend gut zu kennen. Es ist daher einfacher, von einem reinen Quantenzustand in einen gemischten Zustand überzugehen als umgekehrt. Denn die Informationen aus dem reinen Zustand werden durch Verschränkung zerstreut und lassen sich nur schwer wiederherstellen.

Hier ist die Irreversibilität laut Marletto »nur eine Folge der dynamischen Entwicklung des Systems«. Sie folgt