

■ Dämonische Qubits

Experimente zur Thermodynamik der Quantencomputer machen vielversprechende Fortschritte.

Die Thermodynamik ignoriert als phänomenologische Theorie mikroskopische Details und basiert vollständig auf dem beobachteten Verhalten makroskopischer Parameter, wie dem Volumen des Kolbens einer Dampfmaschine. Das Gerüst der Theorie bilden die Hauptsätze. Vor allem der 2. Hauptsatz war seit jeher Gegenstand lebhafter Diskussion. Nach der Formulierung von Clausius gibt es keine Zustandsänderung, die einzig Wärme von einem Körper niedriger auf einen Körper höherer Temperatur überträgt. Das ist im Einklang mit unserer Alltagserfahrung.

James Maxwell fragte 1867, ob der 2. Hauptsatz nur für das typische, mittlere Verhalten von makroskopischen Systemen gilt, oder ob auch einzelne, mikroskopische Teilchen ausschließlich ihren Weg von warm nach kalt finden. Intuitiv würde man erwarten, dass sich Information über die physikalischen Parameter der einzelnen Teilchen nutzen lassen könnte, um Wärme auf der makroskopischen Ebene in die „verkehrte“ Richtung fließen zu lassen. Um diese Information zu sammeln und zu nutzen, führte Maxwell eine Art außerweltliche Intelligenz ein, die von Lord Kelvin später „Maxwellscher Dämon“ getauft wurde. Fast hundert Jahre blieb unklar, ob Maxwells Idee die

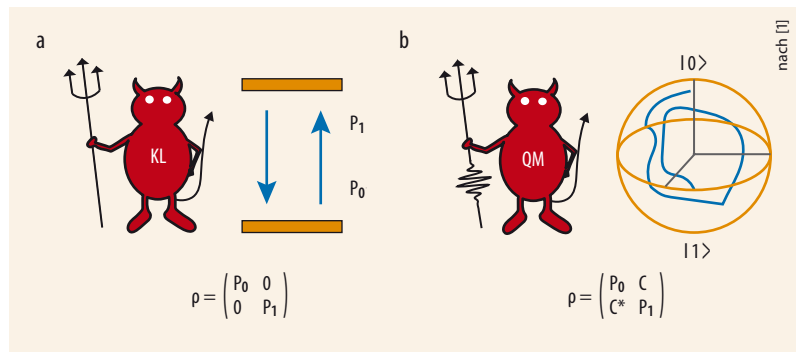


Abb. 1 Klassischer (KL) und quantenmechanischer (QM) Maxwell-Dämon: Im klassischen Fall (a) lässt sich die Dynamik als Entwicklung definierter Eigenzustände ansehen, im Quantenfall (b)

ergeben sich kohärente Überlagerungen, und die Zustände lassen sich nicht mehr länger als klassische Mischung ansehen.

Grundprinzipien der Thermodynamik verletzt oder ob deren Formulierung unvollständig war.

Nun ist es gelungen, einen „Quantendämon“ zu verwirklichen (Abb. 1) [1]. Grundlage dafür sind die Arbeiten von Rolf Landauer, der in den 1960er-Jahren erkannte, dass Information eine thermodynamische Größe ist, die den gleichen Gesetzen unterworfen ist wie Arbeit und Wärme. Insbesondere wurde klar, dass Schreiben und Löschen von Information nur unter Aufwand von Wärme oder Arbeit zu leisten ist. Angewandt auf den Maxwellschen Dämon besagt Landauers Formulierung des 2. Hauptsatzes, dass die gewonnene Information entweder überschrieben oder gelöscht werden muss, um den Dämon am Laufen zu halten. Im Detail zeigte er, dass das Löschen eines einzelnen Bits mindestens $k_B T \ln(2)$ an thermodynamischer Arbeit erfordert. Das ist genau die Energie, die der Maxwell-Dämon scheinbar aus der Beobachtung der mikroskopischen Eigenschaften einzelner Teilchen gewinnt.

In den vergangenen fünf Jahren gab es eine wahre Renaissance der „Thermodynamik der Information“ [2, 3]. Die Gründe dafür sind vielschichtig, lassen sich aber an zwei Durchbrüchen festmachen: Ende der 1990er-Jahre wurde die Thermodynamik durch die Entdeckung der Fluktuationstheoreme

deutlich erweitert. Diese exakten Relationen drücken aus, dass in allen thermodynamischen Prozessen die Wahrscheinlichkeit, eine Verletzung des 2. Hauptsatzes zu beobachten, nur exponentiell klein, aber nicht Null ist. Nur im Mittel über viele Realisierungen des gleichen Prozesses ist die Entropieproduktion positiv, d. h. es gibt eine nichtverschwindende Wahrscheinlichkeit dafür, dass bei einzelnen Beobachtungen Wärme doch von kalt nach warm fließen kann. Der zweite Durchbruch besteht in der experimentellen Realisierung von Systemen, die man zu Recht als Quantencomputer bezeichnen kann, wie die kommerziell verfügbaren Plattformen von DWave, Google, Rigetti und IBM.

Eine naheliegende Frage ist, wie man die thermodynamischen Ressourcen quantifiziert, die notwendig sind, um ein Qubit an Information zu schreiben, und mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Ressourcen in Widerspruch zu klassischen Formulierungen der Thermodynamik geraten.

Diese Frage auf rein theoretischem Wege zu beantworten, erweist sich als schwierig, denn viele Begriffe aus der klassischen Thermodynamik lassen sich nur schwer auf Quantensysteme verallgemeinern. So ist Arbeit sowohl in der klassischen Mechanik als auch in der Thermodynamik als Funk-

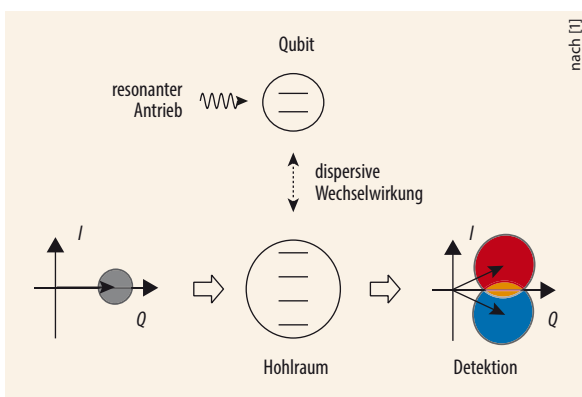


Abb. 2 Das Experiment besteht aus einem quantenmechanischen Zwei-Niveau-System (Qubit), das über eine dispersive Wechselwirkung an einen Hohlraum koppelt, die sowohl schwache als auch starke Messungen am Qubit-Zustand erlaubt. Ein resonanter Antrieb mit der Qubit-Übergangsfrequenz sorgt für eine kohärente Entwicklung.

tional einer Kraft entlang eines Pfades gegeben. Möchte man diese Definition auf ein Quantensystem übertragen, ergibt sich das Problem, dass die quantenmechanische Unschärferelation die Identifikation eines eindeutigen Pfades im klassischen Phasenraum verbietet. Experimente sind daher essenziell, um eine neue und in sich geschlossene Theorie der thermodynamischen Eigenschaften von Quantencomputern zu entwickeln.

Eine Sonderstellung in den verfügbaren Systemen nehmen die supraleitenden Qubits im Labor von Kater Murch von der Washington University in St. Louis ein [4, 5]. Der Zustand solcher Qubits lässt sich mit Hilfe „schwacher Messungen“ ermitteln. Übliche Messungen an Quantensystemen zerstören den Quantenzustand („Kollaps der Wellenfunktion“). In einer schwachen Messung wird ein Quantensystem „schwach“ an ein „Hilfssystem“ gekoppelt, und das Qubit erfährt die Zeitentwicklung gemeinsam mit dem Hilfssystem (Abb. 2). Dadurch wird Information über den Zustand des Qubits in den Korrelationen der beiden Systeme gespeichert.

Durch Messung des Zustands des Hilfssystems kann man den Qubit-Zustand näherungsweise rekonstruieren, ohne ihn zu zerstören. Damit ist es Murch gelungen, die Zeitentwicklung des Qubits direkt zu messen und als Trajektorie auf der Bloch-Kugel darzustellen! Zudem konnte er Arbeit und Entropieproduktion entlang dieser „Quantentrajektorien“ definieren und messen. Das Problem der Unschärferelation ist damit vermieden.

Nach einigen bahnbrechenden Ergebnissen in der stochastischen Thermodynamik der Quantensysteme konnte Murch erstmals einen Maxwell-Dämon in solchen Qubits realisieren [1]. Die Idee ist, die zeitaufgelösten Trajektorien zu verwenden, um die Kontrollfelder zu steuern und die Zeitentwicklung des Qubits auf eine bestimmte Trajektorie zu zwingen. In vollständiger Analogie zum klassischen Dämon wird der Zustand des Qubits zeitaufgelöst gemessen. Be-

wegt sich dieser etwa in Richtung der x -Achse, und möchte man den Zustand lieber in z -Richtung haben, legt man ein entsprechendes magnetisches Feld an, das den Quantenzustand in die gewünschte Richtung zwingt. Darüber hinaus haben Murch und seine Mitarbeiter gezeigt, dass die Entropieproduktion entlang dieser Quantentrajektorien dem entsprechenden Fluktuationstheorem gehorcht.

Die Bedeutung dieses Experiments ist nur schwer zu überschätzen. Nicht nur ist der erste Quantendämon mit zeitaufgelöster Kontrolle gelungen, sondern das Experiment ist auch ein erster wichtiger Schritt, um die thermodynamischen Ressourcen für die Kontrolle von einzelnen Qubits besser zu verstehen.

Allerdings hat das Experiment noch den Mangel, dass die Beobachtung nicht Teil des eigentlichen Systems ist. Stattdessen ist der „Dämon“ der Experimentator selbst. Um wirklich die thermodynamischen Eigenschaften von Quantencomputern zu verstehen, würde man gerne die Informa-

tionsverarbeitung in autonomen Systemen beobachten. Für das gezeigte System bedeutet dies, dass man sich vorstellen könnte, das „System-Qubit“ an ein weiteres „Kontroll-Qubit“ zu koppeln und den Quantenzustand beider getrennt voneinander, zeitaufgelöst zu messen.

Dieses und andere Experimente sind derzeit in Entwicklung, und weitere bahnbrechende Ergebnisse sollten nicht lange auf sich warten lassen. Über 150 Jahre nachdem der klassische Maxwell Dämon das Licht der Welt erblickt hat, ist nun der Quantendämon eine experimentelle Realität geworden und bestärkt die Hoffnung auf eine vollständige Beschreibung der Thermodynamik der Quantencomputer.

Sebastian Deffner

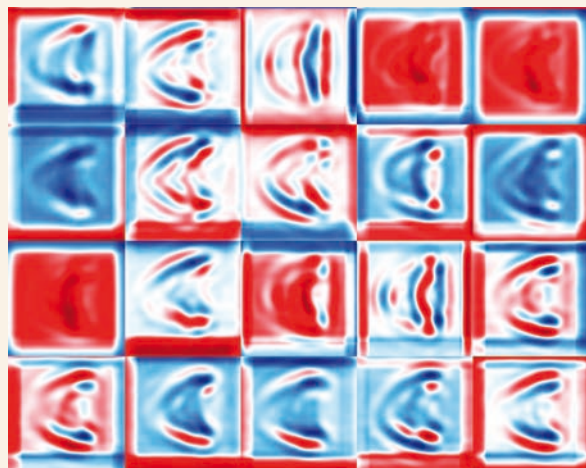
- [1] *M. Naghiloo et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 030604 (2018)
- [2] *J. M. R. Parrondo et al.*, Nat. Phys. **11**, 131 (2015)
- [3] *S. Deffner und C. Jarzynski*, Phys. Rev. X **3**, 041003 (2013)
- [4] *M. Naghiloo et al.*, arXiv:1703.05885v2 (2017)
- [5] *N. Foroozani et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 110401 (2016)

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ TESTET SCHNELLER

Experimentalphysikern an der Universität des Saarlandes ist es gelungen, mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz in Sekundenschnelle die Form roter Blutzellen zu klassifizieren. Die Methode ist deutlich schneller als die bisher möglichen Tests und könnte in Zukunft für eine bessere Diagnose von Krankheiten wie Diabetes, Malaria oder Sichelzellenanämie sorgen, die mit einer veränderten Form der Blutzellen einhergehen.

Um die Blutzellen anhand ihrer Form zu klassifizieren, nutzten die Physiker ein künstliches neuronales Netzwerk und trainierten es darauf, bestimmte Muster zu erkennen. Dazu pressten sie gewaschenes Blut, das nur noch rote Blutzellen enthielt, durch Mikroröhrchen und nahmen Bilder

mit einem Hellfeldmikroskop auf. In den Datensätzen identifizierten sie besondere Formen, die beispielsweise einem Croissant oder einem Pantoffel ähneln. Damit lernte die Analysesoftware, Zwischenformen zu unterscheiden und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einer der Grundformen zuzuordnen. Die Methode eignet sich auch für andere Anwendungen. *A. Kihm et al.*, PLoS Comput. Biol. **14**, e1006278 (2018)



Kihm, Quint, Wagner