

Quantenregeln für die Unordnung

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gilt als unumstößliches physikalisches Gesetz. Allerdings fußt er auf Konzepten aus dem 19. Jahrhundert. Dass auf großen Skalen manche Prozesse unumkehrbar sind, führen moderne Ansätze auf quantenmechanische Information zurück.

► spektrum.de/artikel/2169843



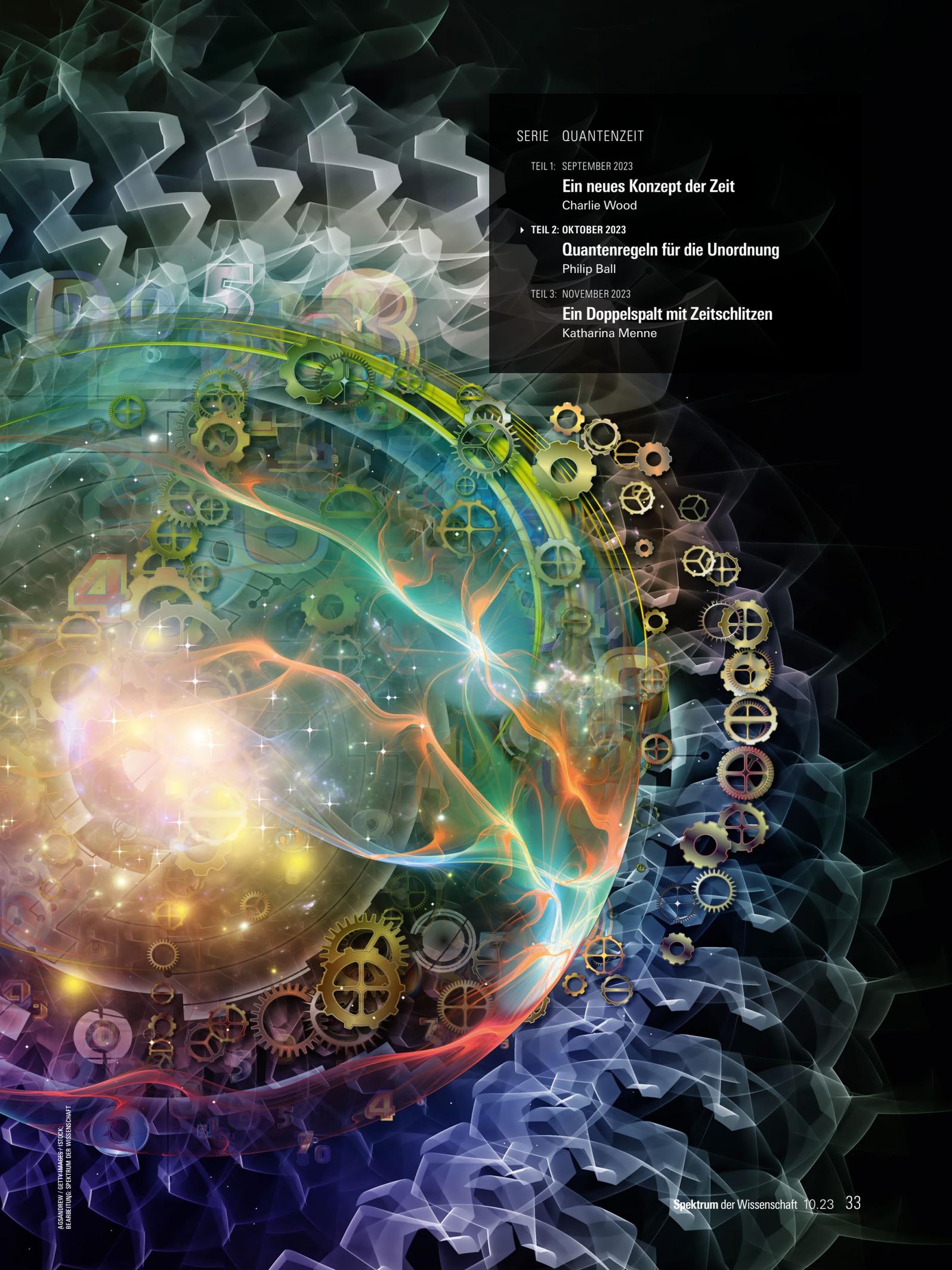
Philip Ball ist Wissenschaftsjournalist in London.

AUF EINEN BLICK

Dampfmaschine trifft auf Quantenmechanik

- 1** Die Zeit der industriellen Revolution wurde durch Maschinen geprägt, die Energie umwandeln. Die damals entwickelte Wärmelehre bot einen theoretischen Rahmen für diese Erfindungen.
- 2** Eine Grundregel der Thermodynamik lautet: Jedes System strebt mit der Zeit zu größerer Unordnung. Doch die Argumentation beruht auf der Statistik sehr großer Zahlen von Teilchen.
- 3** Es ist umstritten, wie solche Wahrscheinlichkeitsaussagen aus dem eigentlich deterministischen mikroskopischen Bild hervorgehen. Ansätze auf Basis der Quantenmechanik liefern Erklärungen.

VOM QUANT ZUR MASCHINE
Die Regeln, nach denen klassische Wärmekraftmaschinen funktionieren, müssen letzten Endes aus subatomaren Zusammenhängen hervorgehen.



SERIE QUANTENZEIT

TEIL 1: SEPTEMBER 2023

Ein neues Konzept der Zeit

Charlie Wood

▶ TEIL 2: OKTOBER 2023

Quantenregeln für die Unordnung

Philip Ball

TEIL 3: NOVEMBER 2023

Ein Doppelspalt mit Zeitschlitzen

Katharina Menne

▶ In der Physik gibt es wohl kein Prinzip, das so unantastbar ist wie der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Laut ihm nimmt die Entropie, das ist eine Art Maß für die Unordnung eines Systems, immer zu oder bleibt zumindest gleich. »Wenn jemand Sie darauf hinweist, dass die von Ihnen bevorzugte Theorie des Universums den maxwellschen Gleichungen widerspricht – nun, können Sie sagen, um so schlimmer für die maxwellschen Gleichungen«, schrieb der britische Astrophysiker Arthur Eddington 1928 in seinem Buch »The Nature of the Physical World« (1931 unter dem deutschen Titel »Das Weltbild der Physik und ein Versuch seiner philosophischen Deutung« erschienen). »Wenn es sich herausstellt, dass sie mit der Beobachtung unvereinbar ist – gut, auch Experimentalphysiker pfuschen manchmal. Aber wenn Ihre Theorie gegen den zweiten Hauptsatz verstößt, dann ist alle Hoffnung vergebens. Dann bleibt ihr nichts mehr übrig, als in tiefster Demut in der Versenkung zu verschwinden.« Ein Verstoß gegen dieses Gesetz wurde noch nie beobachtet und ist nicht zu erwarten.

Dennoch, einige Fachleute beunruhigt etwas am zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Sie sind nicht davon überzeugt, dass wir ihn richtig verstehen oder dass er auf soliden Fundamenten ruht. Obwohl er als Gesetz gilt, basiert er üblicherweise bloß auf probabilistischen Argumenten: Das Ergebnis eines Prozesses ist stets das wahrscheinlichste. Angesichts der üblicherweise ungeheuer großen Zahl von beteiligten Teilchen bedeutet das letztlich, dass dieser eine Ausgang unvermeidlich ist.

Doch für viele ist eine bloße Beschreibung dessen, was vermutlich passieren wird, unbefriedigend. »Von physikalischen Gesetzen erwarten wir Exaktheit«, sagt die Physikerin Chiara Marletto von der University of Oxford. Lässt sich der zweite Hauptsatz zu mehr als nur einer Aussage über Wahrscheinlichkeiten kondensieren?

Bei dieser Frage scheinen mehrere Forschungsgruppen nun unabhängig voneinander zu einer Antwort gelangt zu sein. Sie verknüpfen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik mit den Prinzipien der Quantenmechanik – denen, so vermuten einige, auf einer fundamentalen Ebene Richtungsabhängigkeit und Irreversibilität innewohnen. Wenn man dieser Auffassung folgt, dann entsteht der zweite Hauptsatz nicht durch klassische Wahrscheinlichkeiten, sondern auf Grund von Quanteneffekten wie der Verschränkung. Er ergibt sich aus der Art und Weise, wie Quantensysteme Informationen austauschen, und aus grundlegenden Prinzipien, die festlegen, was dort geschehen darf und was nicht. In diesem Sinn ist eine Zunahme der Entropie mehr als nur das wahrscheinlichste Ergebnis einer Veränderung. Sie ist eine logische Konsequenz einer ganz grundlegenden Ressource: der Quanteninformation.

Die Thermodynamik wurde im frühen 19. Jahrhundert entwickelt und sollte beschreiben, wie Wärme fließt und Arbeit verrichtet wird. Eine solche Theorie wurde dringend benötigt, während die Dampfkraft die industrielle Revolution vorantrieb und die Ingenieure ihre Maschinen so effizient wie möglich machen wollten. Letztendlich

wurde die Thermodynamik zu einer der zentralen Säulen der modernen Physik. Sie lieferte Kriterien, nach denen sich alle veränderlichen Prozesse richten.

Die klassische Thermodynamik kennt nur eine Hand voll Gesetze, von denen das erste und das zweite die grundlegenden sind. Der erste Hauptsatz besagt, dass Energie in einem geschlossenen System immer erhalten bleibt; gemäß des zweiten fließt Wärme immer vom heißen zum kalten Bereich. Im Allgemeinen wird Letzteres mittels des Begriffs der Entropie ausgedrückt. Sie darf insgesamt nicht abnehmen. In Alltagssprache übertragen wird Entropie häufig mit Unordnung gleichgesetzt. Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann definierte sie strenger als eine Größe, die sich auf die Gesamtzahl der Mikrozustände in einem System bezieht. Dabei geht es um die Anzahl von Möglichkeiten, wie Teilchen angeordnet sein können.

Das scheint zu erklären, warum Veränderungen überhaupt stattfinden. Denn auf der Ebene einzelner Teilchen lassen sich alle klassischen Bewegungsgesetze hinsichtlich der Zeit einfach umkehren. Demnach könnte jeder Prozess grundsätzlich ebenso gut rückwärts ablaufen und sich beispielsweise ein verquirltes Ei wieder in Eigelb und Eiweiß trennen. Doch laut des zweiten Hauptsatzes

VERWIRBELTE TINTE In klarem Wasser breiten sich Farbstoffmoleküle so lange aus, bis sie gleichmäßig verteilt sind. Damit steigt die Entropie. Die Thermodynamik verbietet den umgekehrten Vorgang – nie wird man erleben, wie sich Lösungsmittel und Tinte von selbst entmischen.



müssen Vorgänge in einer Weise stattfinden, bei denen sich die Entropie erhöht. Das wird gemeinhin als Ursache dafür angesehen, dass die Zeit eine Richtung hat. Dieser Interpretation zufolge fließt die Zeit von der Vergangenheit in die Zukunft, weil das Universum – aus Gründen, zu denen es weder Klarheit gibt noch Einigkeit herrscht – auf einen Zustand mit immer höherer Entropie zusteuert. Schließlich sollte sich die Wärme völlig gleichmäßig verteilen. Daraufhin gibt es keine treibende Kraft mehr für weitere Veränderungen. Diese bedrückende Perspektive bezeichnete der deutsche Physiker und Entdecker des zweiten Hauptsatzes Rudolf Clausius im 19. Jahrhundert als Wärmetod des Universums.

Die mikroskopische Beschreibung der Entropie durch Boltzmann scheint diese Richtungsabhängigkeit zu erklären. Systeme mit vielen Teilchen, die ungeordneter sind und eine höhere Entropie aufweisen, überwiegen bei Weitem gegenüber solchen mit geringerer Entropie. Molekulare Wechselwirkungen rufen mit größerer Wahrscheinlichkeit Zustände hervor, die weniger stark geordnet sind. Der zweite Hauptsatz scheint also nur eine Frage der Statistik zu sein, ein Gesetz der großen Zahlen. Nach dieser Auffassung gibt es keinen fundamentalen Grund, warum die Entropie nicht abnehmen kann und warum sich zum Beispiel nicht alle Luftmoleküle zufällig in einer Ecke eines Zimmers versammeln. Das wäre lediglich ungeheuer unwahrscheinlich.

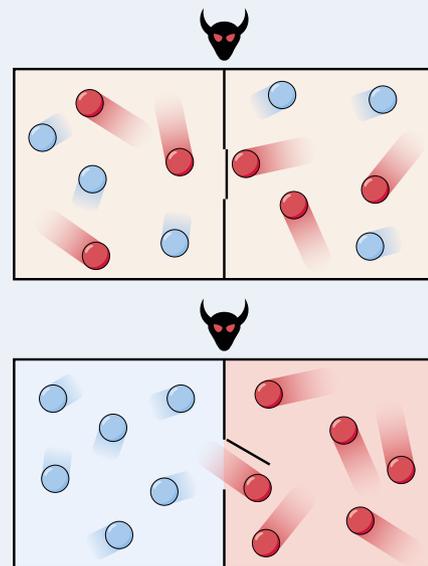
Diese statistische Physik lässt jedoch einige Fragen offen. Sie verweist auf die wahrscheinlichsten Mikrozustände in einem ganzen Ensemble von Möglichkeiten und zwingt dazu, sich mit Durchschnittswerten darüber zu begnügen. Allerdings sind die Gesetze der klassischen Physik deterministisch – sie lassen für jede Ausgangssituation nur ein Resultat zu. Auf welchem Teil des Wegs kommt das hypothetische Ensemble von Zuständen überhaupt ins Spiel, wenn doch nur ein einziges Ergebnis möglich ist?

Von Grund auf neu konstruierte Physik

David Deutsch von der University of Oxford versucht seit einigen Jahren, dieses Dilemma zu umgehen. Er entwickelt eine Theorie, die, wie er es ausdrückt, »eine Welt beschreibt, in der Wahrscheinlichkeit und Zufall bei physikalischen Prozessen völlig unerheblich sind«. Sein Projekt, an dem Chiara Marletto inzwischen beteiligt ist, nennt sich Konstruktorthorie. Sie zielt darauf ab, nicht nur festzustellen, welche Prozesse wahrscheinlich stattfinden können und welche nicht, sondern auch, welche überhaupt erlaubt und welche verboten sind.

Im Rahmen der Konstruktorthorie soll letztlich die gesamte Physik in Form von Aussagen über mögliche und unmögliche Transformationen ausgedrückt werden. Das Modell knüpft an die Anfänge der Thermodynamik an, indem es Veränderungen als etwas betrachtet, das von Maschinen (Konstruktoren) erzeugt wird. Diese arbeiten zyklisch und folgen einem Muster, das dem so genannten Carnot-Zyklus entspricht, der seit dem 19. Jahrhundert die Arbeitsweise von Motoren beschreibt. Der Konstruktor ist

Maxwells Dämon



SPERTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE ZEITZ

Ein Raum ist mit Gas einheitlicher Temperatur gefüllt. Das entspricht auf mikroskopischer Ebene Molekülen, die zwar unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen, sich aber wahllos im gesamten Volumen verteilt haben. Diese Unordnung bedeutet hohe Entropie.

Ein hypothetisches Wesen – ein Dämon – könnte den Raum nun zweiteilen und mit einer Tür versehen, für deren Öffnung es keine Energie aufwenden muss. Nun lässt es in der einen Richtung lediglich die schnellen Teilchen passieren, in der anderen nur die langsamen. So würden sich in einer Hälfte Moleküle mit größerer Energie sammeln, das heißt höherer Temperatur. Gegenüber dem Anfangszustand wäre die Entropie des Systems insgesamt gesunken – das aber verbietet der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.

Das Gedankenexperiment von James Clerk Maxwell beschäftigt Fachleute seit dem 19. Jahrhundert und trug dazu bei, theoretische Konzepte zu schärfen. Überlegungen dazu, wie das Wesen die Zustände der einzelnen Teilchen in Erfahrung bringen kann und wie es mit diesem Wissen umgehen muss, führten schließlich zur Lösung des Dilemmas: Auch Messungen und deren Verarbeitung tragen zur Entwicklung der Entropie bei. Das verdeutlicht die Bedeutung der Quanteninformation für die Thermodynamik.

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

nicht aus statistischen Überlegungen. In diesem Fall ist sie nicht bloß das wahrscheinlichste Ergebnis, sondern unvermeidlich und durch die quantenmechanischen Wechselwirkungen des Systems bestimmt. »Unsere Vermutung ist«, so Marletto, »dass sich die thermodynamische Irreversibilität darauf zurückführen lässt.«

Einen weiteren gedanklichen Zugang zum zweiten Hauptsatz hat der schottische Wissenschaftler James Clerk Maxwell entwickelt, der zusammen mit Boltzmann die statistische Sichtweise der Thermodynamik begründete. Maxwell verknüpfte die Regeln der Thermodynamik mit dem Konzept der Information.

Maxwell beunruhigten die theologischen Implikationen eines kosmischen Wärmetods und der Unumkehrbarkeit von Vorgängen, die den freien Willen zu untergraben schienen. Daher suchte er 1867 nach einer Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz zu widerlegen. In seinem hypothetischen Szenario verwandelt ein mikroskopisch kleines Wesen (das später zu seinem Unmut als Dämon bezeichnet wurde) die scheinbar unnütze Wärme zurück in eine Ressource, mit der sich Arbeit verrichten lässt. Maxwell hatte zuvor nachgewiesen, dass in einem Gas im thermischen Gleichgewicht mehrere molekulare Energien vorherrschen. Manche Moleküle sind sozusagen heißer als andere – sie bewegen sich schneller. Aber alle Teilchen sind zufällig durchmischt, so dass es keine Möglichkeit zu geben scheint, diese Unterschiede zu nutzen.

Hier kommt der maxwellsche Dämon ins Spiel (siehe »Maxwells Dämon«). Er teilt den Raum in zwei Hälften und baut eine reibungsfreie Tür zwischen ihnen ein. Der Dämon lässt die heißen Moleküle in die eine Richtung passieren, aber nicht in die andere. Schließlich hat er so ein heißes Gas auf der einen Seite und ein kühleres auf der anderen hergestellt, und er kann das Temperaturgefälle ausnutzen, um eine Maschine anzutreiben.

Um den zweiten Hauptsatz scheinbar zu unterlaufen, hat der Dämon Informationen über die Bewegungen der Moleküle verwendet. Information ist also eine Ressource, die man zur Verrichtung von Arbeit verwenden kann. Doch sie bleibt auf unseren makroskopischen Skalen verborgen; deswegen können wir sie nicht nutzen. Wegen dieser unvermeidlichen Unkenntnis der Mikrozustände kann die klassische Thermodynamik nur von Durchschnittswerten und Ensembles sprechen.

Ein Jahrhundert später bewies der Physiker Rolf Landauer, dass Maxwells Dämon den zweiten Hauptsatz nicht aushebeln kann. Denn die gesammelten Informationen müssen irgendwo gespeichert werden, und jeder endliche Speicher muss schließlich geleert werden, um Platz für neue zu schaffen. Landauer zeigte 1961, dass

dieses Löschen von Informationen nicht möglich ist, ohne eine minimale Wärmemenge abzuführen und damit die Entropie der Umgebung zu erhöhen.

Für diese informationstheoretische Sicht auf den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik entwickeln Fachleute inzwischen eine neue, quantenmechanische Perspektive. Das liegt zum Teil an der Auffassung, dass die Quantenmechanik eine grundlegendere Beschreibung darstellt – schließlich verhalten sich die Gasteilchen nicht wie klassische Billardkugeln. Darüber hinaus spiegelt das Bestreben das aufkeimende Interesse an der Quanteninformationstheorie selbst wider. Quantenmechanische Prinzipien, insbesondere die Verschränkung von Teilchen, erlauben einen viel weitergehenden Umgang mit Information als auf klassischem Weg.

Axiome für eine vernünftige Thermodynamik

Insbesondere bietet der Ansatz eine Möglichkeit, das statistische Bild loszuwerden, bei dem man Durchschnittswerte über Ensembles vieler verschiedener Mikrozustände bilden muss. »Das wirklich Neue ist die Erkenntnis, dass man im Rahmen der Quanteninformation Ensembles durch eine Verschränkung mit der Umgebung ersetzen kann«, sagt Carlo Maria Scandolo von der kanadischen University of Calgary. Ihm zufolge spiegelt der Rückgriff auf ein Ensemble die Tatsache wider, dass wir nur Teilinformationen über den Zustand haben – es könnte dieser oder jener Mikrozustand sein, mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten. So müssen wir einen Mittelwert über eine Verteilung bilden. Die Quantentheorie bietet jedoch eine andere Möglichkeit, Zustände mit Teilinformationen zu erzeugen: durch Verschränkung. Verknüpft man auf die Art ein Quantensystem mit seiner Umgebung, über die wir nicht alles wissen können, geht unweigerlich ein Teil der Information über das System selbst verloren. Es endet in einem gemischten Zustand, über den man nicht einmal theoretisch alles wissen kann, sofern man sich bloß auf das System konzentriert.

Dann ist man gezwungen, von Wahrscheinlichkeiten zu sprechen, und zwar nicht, weil es Dinge über das System gibt, die man nicht weiß, sondern weil einige dieser Informationen grundsätzlich nicht bekannt sind. »Auf diese Weise ergeben sich Wahrscheinlichkeiten ganz natürlich aus der Verschränkung«, so Scandolo. »Die ganze Vorstellung, das thermodynamische Verhalten könne man unter Berücksichtigung der Umgebung bestimmen, funktioniert nur, solange es Verschränkung gibt.«

2015 hat Scandolo zusammen mit Giulio Chiribella von der Universität Hongkong vier Axiome formuliert, die erforderlich sind, um mit den Mitteln der Quanteninformation eine »vernünftige Thermodynamik« zu erhalten – das heißt eine, die nicht auf Wahrscheinlichkeiten beruht. Die Axiome beschreiben, welche Eigenschaften die Information in einem Quantensystem haben muss, das mit seiner Umgebung verschränkt ist. Insbesondere stellen sie sicher, dass alles, was mit dem System und seiner Umge-

Quantenmechanik erlaubt einen viel weitergehenden Umgang mit Information

bung geschieht, im Prinzip umkehrbar ist, so wie es die übliche mathematische Formulierung für die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems vorsieht.

Als Folge dieser Axiome, so zeigten Scandolo und Chiribella, werden eingangs voneinander unabhängige Systeme durch reversible Wechselwirkungen immer stärker miteinander korreliert. Korrelationen sind das, was verschränkte Objekte aneinanderkoppelt: Die Eigenschaften des einen sind mit denen des anderen verknüpft. Ein Maß für die Stärke des wechselseitigen Zusammenhangs ist die »gegenseitige Information«, eine Größe, die mit der Entropie verbunden ist. Das heißt: Alles, was einschränkt, wie sich die Korrelationen verändern können, begrenzt ebenso die Möglichkeiten für die Entropie. Wenn die Entropie des Systems abnimmt, muss sie in der Umgebung zunehmen, so dass die Summe der beiden Entropien niemals abnehmen kann. Auf diese Weise leitet der neue Ansatz die Entropie aus den zu Grunde liegenden Axiomen ab, anstatt sie von vornherein zu postulieren.

Einen vielseitigen Zugang zu dieser neuen Quantenversion der Thermodynamik bieten die so genannten Ressourcentheorien. Sie geben Auskunft darüber, welche Umwandlungen möglich sind und welche nicht. »Eine Ressourcentheorie bietet ein einfaches Modell für Situationen, in denen es aus irgendwelchen Gründen Einschränkungen dafür gibt, welche Handlungen man durchführen und auf welche Systeme man zugreifen kann«, erklärt die theoretische Quantenphysikerin Nicole Yunger Halpern von der University of Maryland.

Quantenmechanische Ressourcentheorien übernehmen das auf Basis der Quanteninformationstheorie entwickelte Bild von der Welt, bei dem es für die möglichen physikalischen Prozesse grundlegende Einschränkungen gibt. Diese werden dort typischerweise als »No-go-Theoreme« ausgedrückt, das sind Aussagen über die Undurchführbarkeit bestimmter Prozesse. So ist es beispielsweise generell unmöglich, einen unbekanntem Quantenzustand zu »klonen«, also ein Qubit auf ein anderes zu kopieren, ohne das ursprüngliche zu verändern.

Ein genauer Blick auf die Details des zweiten Hauptsatzes

Das Rezept für eine Ressourcentheorie hat mehrere Hauptzutaten. Die erlaubten Handlungen werden als freie Operationen bezeichnet. »Sobald man die freien Operationen spezifiziert hat, hat man die Theorie festgelegt«, führt Yunger Halpern aus, »und dann kann man darüber nachdenken, welche Transformationen möglich sind und nach der optimalen Effizienz fragen, mit der wir sie durchführen können.« Eine Ressource ist unterdessen etwas, worauf man zugreifen kann, um etwas Nützliches zu tun. Das kann Kohle sein, mit der man einen Ofen befeuert und eine Dampfmaschine antreibt, oder auch ein zusätzlicher Speicher, der es Maxwells Dämon ermöglicht, das zweite Gesetz der Thermodynamik noch ein wenig länger zu unterlaufen.

Quanten-Ressourcentheorien ermöglichen einen genaueren Blick auf die feinen Details des klassischen zweiten

Es geht um die effiziente Durchführung einer Aufgabe mit verfügbaren Ressourcen

Hauptsatzes. Es ist nicht mehr nötig, über eine riesige Anzahl von Teilchen nachzudenken, sondern man kann Aussagen darüber treffen, was Einzelnen von ihnen erlaubt ist. Wenn wir dies tun, so Yunger Halpern, wird deutlich, dass die klassische Aussage, die Entropie müsse am Ende mindestens derjenigen am Anfang entsprechen, nur eine Art grob gefasste Summe einer ganzen Familie von Ungleichheitsbeziehungen ist. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt zum Beispiel, dass man einen Nichtgleichgewichtszustand in einen ausgeglicheneren Zustand bringen kann. »Aber die Frage, welcher der vielen Zustände näher am thermischen Gleichgewicht liegt, ist nicht einfach zu beantworten«, erläutert Yunger Halpern. Um sie zu klären, »müssen wir eine ganze Reihe von Ungleichungen überprüfen«.

Mit anderen Worten: Bei den Ressourcentheorien scheint es sich um eine ganze Reihe von Miniaturversionen des zweiten Hauptsatzes zu handeln. »Es könnten einige Transformationen geben, die der zweite Hauptsatz erlaubt, die aber durch diese kleinteiligere Familie von Ungleichungen verboten sind«, sagt Yunger Halpern. Aus diesem Grund, fügt sie mit Blick auf ihren Forschungsbe reich hinzu, »habe ich manchmal das Gefühl, dass alle ihre ganz persönlichen zweiten Hauptsätze haben.«

Der ressourcentheoretische Ansatz, urteilt der Physiker Markus P. Müller von der Universität Wien, »erlaubt eine vollständige, mathematisch rigorose Herleitung der thermodynamischen Gesetze, ohne irgendwelche konzeptuellen oder mathematischen Unklarheiten.« Der Ansatz erfordere eine Neubetrachtung dessen, »was man eigentlich unter Thermodynamik versteht«. Es geht nicht mehr so sehr um die durchschnittlichen Eigenschaften vieler Teilchen, sondern um den Versuch, eine Aufgabe mit den verfügbaren Ressourcen effizient durchzuführen. Letztlich geht es aber immer noch um Information. Die Notwendigkeit, sie zu verwerfen beziehungsweise das Unvermögen, sie vollumfänglich im Blick zu behalten, ist laut Yunger Halpern der eigentliche Grund, warum es den zweiten Hauptsatz gibt.

All diese Bemühungen, die Thermodynamik mitsamt des zweiten Hauptsatzes auf ein neues Fundament zu stellen, erinnern an einen Auftrag, den der deutsche Mathematiker David Hilbert im Jahr 1900 formulierte. Er identifizierte in seinem Fachgebiet 23 Probleme, denen man sich im 20. Jahrhundert widmen sollte. Punkt sechs dieser beim Internationalen Mathematiker-Kongress in Paris vorgestellten Liste lautete, »diejenigen physikalischen Disziplinen axiomatisch zu behandeln, in denen schon heute die Mathematik eine hervorragende Rolle spielt«. Hilbert war besorgt darüber, dass die Physik

seiner Zeit auf willkürlichen Annahmen zu beruhen schien, und er wollte sie wie die Mathematik auf solide Grundlagen stellen.

Einige arbeiten heute noch an Hilberts sechstem Problem und versuchen insbesondere, die Quantenmechanik und ihre Verallgemeinerung, die Quantenfeldtheorie, mit Hilfe von Axiomen neu zu formulieren. Allerdings ging es Hilbert gerade auch um die Thermodynamik: »Was die Axiome der Wahrscheinlichkeitsrechnung angeht, so scheint es mir wünschenswert, daß mit der logischen Untersuchung derselben zugleich eine strenge und befriedigende Entwicklung der Methode der mittleren Werte in der mathematischen Physik, speciell in der kinetischen Gastheorie Hand in Hand gehe.«

Die Geister scheiden sich darüber, ob Hilberts Wunsch für den Fall des zweiten Hauptsatzes bereits erfüllt wurde. »Ich denke, dass Hilberts sechstes Problem noch lange nicht vollständig gelöst ist und halte es für einen faszinierenden und wichtigen Aspekt der physikalischen Grundlagenforschung«, meint Scandolo. »Die noch offenen Fragen dürften in absehbarer Zeit beantwortet werden, sofern man ihnen genügend Zeit und Energie widmet.« Der eigentliche Wert einer konzeptuellen Neuaufstellung des zweiten Hauptsatzes liegt darin, dass es unser Verständnis des Gesetzes selbst vertiefen würde. Yunger Halpern vergleicht die Motivation für die Arbeit daran mit dem Grund, warum Literaturwissenschaftler immer noch die Stücke von Shakespeare analysieren. Sie tun es nicht unbedingt, weil eine neue Betrachtung korrekter wäre, sondern weil derart tiefgründige Werke eine unerschöpfliche Quelle der Inspiration und der Erkenntnis sind. ◀

QUELLEN

Chiribella, G., Scandolo, C. M.: Operational axioms for diagonalizing states. ArXiv 1506.00380, 2015

Landauer, R.: Irreversibility and heat generation in the computing process. IBM Journal of Research and Development 5, 1961

Marletto, C. et al.: Emergence of constructor-based irreversibility in quantum systems: Theory and experiment. Physical Review Letters 128, 2022



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

spektrum.de/t/quantenphysik

Quanta magazine

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Physicists Rewrite the Fundamental Law That Leads to Disorder« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredaktion: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleitung: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang, Mike Zeitz (stellv. Redaktionsleiter); E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Claus Schäfer, Oliver Gabriel, Anke Heinkelmann, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg,

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751,

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Assistenz Geschäftsleitung: Stefanie Lacher

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744

Übersetzung: An diesem Heft wirkte mit: Dr. Sebastian Vogel

Leser- und Bestellservice: Estefanny Espinosa de Rojas, Helga Emmerich, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 9,80 (D/A/L), CHF 14,-; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 105,60; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 82,10. PDF-Abonnement € 63,-, ermäßigt € 48,-.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder von ABSOLVENTUM MANNHEIM e. V., des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio), des VCBG und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Einem Teil der Auflage liegt Werbung der Firmen RSD Reise Service Deutschland GmbH, Pro Idee GmbH & Co. KG und des Stern-Magazins bei.

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 44 vom 1.1.2023.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks ohne die Quellenangabe in der nachstehenden Form berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2023 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Laura Helmuth
President: Kimberly Lau

Erhältlich im Zeitschriften- und Buchhandelsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

