

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