

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.

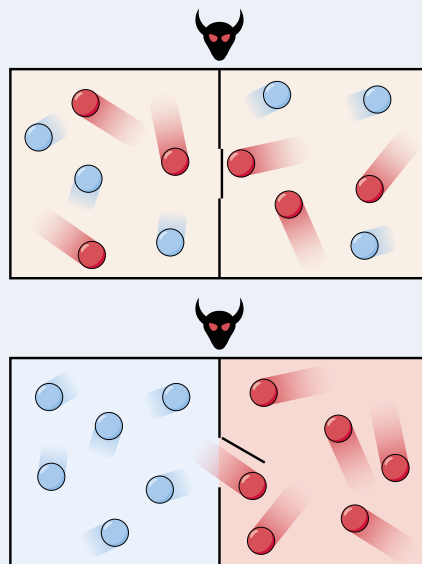
Diese statistische Physik lässt jedoch einige Fragen offen. Sie verweist auf die wahrscheinlichsten Mikrozustände in einem ganzen Ensemble von Möglichkeiten und zwingt dazu, sich mit Durchschnittswerten darüber zu begnügen. Allerdings sind die Gesetze der klassischen Physik deterministisch – sie lassen 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.