

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 könnte 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