

Realität der Wahrscheinlichkeit

Rapos Rapport. Zu Boltzmanns Zeiten galten Atome und Moleküle, obwohl unter Chemikern schon schwer in Mode, unter Physikern noch als abenteuerliche Hypothese. Über Entropie (Teil 2)

Von Daniel H. Rapoport

Ein Ganzes aus seinen Teilen zu erklären ist immer heikel. Allerhand Denkfallen warten nur darauf, jeden Moment zuzuschnappen. Wo in einem Kirschkern befindet sich der Bauplan für den Kirschbaum? Welches Zahnrad einer Uhr treibt die Zeiger an? Welches Teil der Uhr misst die Zeit? Das Ganze steht in vielfältigen Beziehungen zu seinen Bestandteilen, ist berühmterweise mehr als seine Summe, unberühmterweise auch weniger; und überhaupt ist die Teil-Ganzes-Beziehung sehr viel schwieriger, als sie scheint.

Derlei Schwierigkeiten waren dem österreichischen Physiker Ludwig Boltzmann durchaus bewusst, als er sich in den 1870ern daran machte, mit seiner »statistischen Mechanik« die unsichtbare Mikrowelt der umherrasenden Atome mit der sichtbaren Makrowelt der uns umgebenden Dinge zu verbinden. Dabei war die Teil-Ganzes-Beziehung noch das Geringste. Allein dafür, dass er die Welt als aus Atomen und Molekülen aufgebaut annahm, wurde Boltzmann stark angefeindet; und von nicht geringen Leuten. Der Physiker Ernst Mach und der Chemiker Wilhelm Ostwald beispielsweise hingen der »Energetik« an – einer Idee, darnach alles letztlich aus fließender, unendlich teilbarer Energie, statt »körnig« aus kleinsten Teilchen zusammengesetzt sei – und polemisierten fleißig gegen Boltzmann und die »Atomistiker«.

Deren Sieg kam 1906 aus unvermuteter Richtung: Seit langem war das Phänomen bekannt, dass Pollenstaub im Wasser unter dem Mikroskop zu tanzen schien (»Brownsche Bewegung«). 1905 erklärte Albert Einstein diese Bewegung durch zufällige Zusammenstöße der Wassermoleküle mit den Staubkörnern. Im Jahre darauf wurden Einsteins Vorhersagen, wie die Brownsche Bewegung von Temperatur und Zähigkeit der Flüssigkeit abhängen müsse, experimentell bestätigt – und damit auch die Existenz von Molekülen.

Boltzmann erreichte dieser Triumph wohl nicht mehr. Er hatte sich, wie in einer klassischen Tragödie, in welcher der Bote mit der erlösenden Botschaft gerade zu spät eintrifft, im selben Jahr erhängt. Wie in allen Suiziden bleibt auch in diesem eine letzte Unerklärlichkeit, aber man vermutet, dass es weniger an seinen wissenschaftlichen Auseinandersetzungen, als an seiner psychischen und physischen Gesundheit gelegen hat.

Indes lässt sich ohne Übertreibung sagen, dass der erste starke Beweis für die Existenz von Atomen Boltzmann zu danken ist. Einstein hatte die Boltzmannsche Programmatik im Grunde rückwärts angewandt. Während Boltzmann von der Bewegung der Teilchen ausging und aus der die makroskopischen Größen (Druck, Temperatur etc.) als Mittelwerte herleitete, interpretierte Einstein die Tanzbewegung der (fast makroskopisch großen) Staubkörner als Schwankung des Mittelwertes vieler Stöße zwischen Staub und Wassermolekülen und schloss aus dieser Schwankung rückwärts auf das Vorhandensein der Moleküle.

Zentral und neu an diesen Ergebnissen war die Anwendung statistischer Methoden bei der Beschreibung der Natur. Dabei betrachtet man – im Gegensatz zur klassischen Beschreibung mittels genauer Zustände und Bewegungsgesetze – Verteilungen von Eigenschaften. Zum Beispiel gibt eine statistische Beschreibung der Geschwindigkeiten von Molekülen nicht mehr von jedem einzelnen Molekül an, mit welcher Geschwindigkeit es sich bewegt, sondern sagt lediglich von jeder Geschwindigkeit, wie häufig sie vorkommt, d. h., wie viele Teilchen sich mit ihr bewegen.

Boltzmanns vermutlich wichtigste Leistung bestand darin, eine Methode zu erfinden, die Anzahl der Zustände zu ermitteln, die einem bestimmten makroskopischen Zustand entsprechen. Diese Anzahl kann man auch »Zahl der Realisierungsmöglichkeiten« eines Makrozustandes nennen, wobei Makrozustand zum Beispiel ein Liter Stickstoff bei 20 Grad Celsius und einem Druck von einem Bar meinen kann. Die »Zahl der Realisierungsmöglichkeiten« gibt an, wie viele Möglichkeiten es gibt, Orte und Geschwindigkeiten der Gasmoleküle so zu verteilen, dass sie diesen Makrozustand erzeugen.

Wenn man den makroskopischen Zustand (Temperatur, Druck etc.) so auffasst – als Realisierung einer Möglichkeit –, dann liegt es sehr nahe, von der Realität in Wahrscheinlichkeiten zu denken. Je mehr Möglichkeiten es gibt, einen makroskopischen Zustand zu realisieren, desto wahrscheinlicher ist er; was häufig vorkommen *kann*, *wird* häufig vorkommen. Boltzmanns Idee, das Makroskopische mit dem Mikroskopischen zu verbinden, besteht genau darin, den wahrscheinlichsten Zustand eines Systems zu ermitteln – aufgefasst als Zustand mit der größten Anzahl von Realisierungsmöglichkeiten. Und damit sind wir wieder bei der Entropie angelangt. Jene »Anzahl von Realisierungsmöglichkeiten« ist direkt mit der Entropie verknüpft; je größer sie ist, desto größer auch die Entropie.

Damit erhellt sich, warum die Entropie geschlossener Systeme eine Richtung hat, d. h., einem Maximum zustrebt. Diese Richtung folgt aus der einleuchtenden Logik, dass es, wenn man lange genug wartet, am wahrscheinlichsten ist, ein System, nunja, in seinem wahrscheinlichsten Zustand vorzufinden. Und an dieser unentrinnbaren Logik liegt ebenfalls, dass die Entropie als jene »große Regisseurin« erscheint, von der ich in der letzten Kolumne ([vgl. junge Welt vom 16.6.2026](#)) schrieb.

Gleichzeitig werden die bis heute andauernden Deutungsschwierigkeiten der Entropie sichtbar: Ist Entropie nun eine objektive Größe physikalischer Systeme, oder hat sie lediglich etwas damit zu tun, dass wir etwas nicht wissen, zum Beispiel die Geschwindigkeit jedes Teilchens? [Der Physiker Edwin Jaynes](#)

[hat 1996 in einem berühmten Aufsatz](#) sehr überzeugend dafür argumentiert, dass die Entropie keine objektive Größe ist, sondern eher unsere methodischen Möglichkeiten widerspiegelt, Genaueres über die Teilchen eines Systems zu erfahren.

Generell stellt die Entropie die Frage nach dem Wirklichkeitsstatus von Wahrscheinlichkeiten, bzw. die Frage, wann und mit welcher Berechtigung man von der genauen Beschreibung eines Systems zu einer statistischen übergehen darf. Die eingangs angeführte Teil-Ganzes-Beziehung taucht als Frage auf, welchem Blickwinkel man geneigt ist, den Vorrang zu geben: Dem, der von der Realität der Teilchen ausgeht; oder dem, der von der Realität von Physikern ausgeht, die Temperaturen messen?

<https://www.jungewelt.de/artikel/526432.universum-realität-der-wahrscheinlichkeit.html>