

Die Physik der ablaufenden Zeit

Der Ansatz der Entropie

Jürgen Audretsch

Dass die Zeit abläuft ist eine elementare und fundamentale Grunderfahrung, die wir alle machen. Sie bestimmt unser Leben. Aber warum läuft die Zeit ab und woran erkennen wir, dass die Zeit abläuft? Es soll im Folgenden versucht werden, hierfür plausible Erklärungen zu finden.

Wie die Zeit vergeht

Festzustellen, dass die Zeit vergeht, scheint eine sehr einfache Aufgabe zu sein. Man schaut auf die Uhr und sieht, dass der Zeiger vorrückt. Man könnte auch eine Pendeluhr nehmen oder noch einfacher, nur die Bewegung des Pendels selber betrachten. Das Pendel soll ohne Bremsung gleichmäßig schwingen und wir zählen z. B. immer dann, wenn es an seinen rechten Umkehrpunkt kommt: 32, 33, 34, 35, usw. Wieso ist bei diesem Vorgang 35 später als 32? Wird Vergangenheit und Zukunft durch die kleinere bzw. größere Zahl bestimmt? Das kann nicht sein, denn man könnte ja auch „falsch“ zählen: 35, 34, 33, 32, usw. oder man könnte eine besonders konstruierte Armbanduhr nehmen, deren Zeiger sich mit anderen Drehsinn bewegen. Würden wir uns dann in die Vergangenheit zurück entwickeln? Niemand wird das vermuten. Aber der Grund liegt nicht im richtigen Abzählen. Es könnte ja sein, dass wir uns in einem Traum befinden. Wir haben die Pendeluhr vor uns und reisen wirklich in die Vergangenheit zurück. Man kann mit der Pendeluhr nicht entscheiden, ob man in der Wirklichkeit oder in diesem Traum ist, weil sie auf einem periodischen Vorgang

beruht. Alle modernen Uhren beruhen ebenfalls auf periodischen Vorgängen.

Aber es gibt ganz einfache Uhren, die eine sichere Unterscheidung ermöglichen und zeigen, dass die Zeit abläuft. Ein Beispiel dafür ist eine Sanduhr. Der Sand rieselt durch die Verengung. Wir können dabei auch rückwärts zählen und wissen dennoch genau, dass wir nicht in dem Traum sind, in dem wir in die Vergangenheit zurück reisen, denn niemand hat jemals beobachtet, dass der Sand, der unten war, sich wieder nach oben bewegt und dort ansammelt. Man sieht daran, dass der Ablauf der Zeit mit *unumkehrbaren physikalischen Vorgängen* verknüpft ist. Man muss allerdings etwas vorsichtig mit der Formulierung sein. Wir werden sehen, dass der Vorgang, bei dem der Sand wieder nach oben geht, zwar möglich, aber zugleich so unwahrscheinlich ist, dass man jede Wette eingehen kann, dass er bei der nächsten Sanduhr, die uns begegnet, nicht eintreten wird. Wir kommen auf dieses Problem noch zurück.

Irreversible Vorgänge und Zeitrichtung

Was ist das Typische an der Sanduhr? Sie ist ein Beispiel dafür, dass es physikalische Vorgänge gibt, die von sich aus – anders als die Pendelbewegung – nur in einer Richtung ablaufen. Den zeitlich umgekehrten Vorgang hat man nie beobachtet. Die Richtung in der sie ablaufen, markiert die Zeitrichtung. Es gibt durch ihn ein „Vorher“ und ein „Hinterher“. Diese Vorgänge heißen *irreversibel*. Wie ermittelt man, welche Vorgänge irreversibel sind? Das ist ganz einfach. Man filmt ein komplexes aus vielen Einzelprozessen bestehendes Geschehen und lässt diesen Film rückwärts laufen. Man kann dann sofort sagen, welche Prozesse bei diesem rückwärts laufendem Film physikalisch möglich sind und welche nicht. So würde man sofort den Vorgang des Rieselns beim Sand von der Pendelbewegung unter-

scheiden können. Auch wenn neben der Sanduhr eine Armbanduhr mit falscher Umlaufrichtung wissen wir ganz unabhängig davon, was der Filmvorführer uns erzählt, wann er den Film vorwärts und wann er ihn rückwärts ablaufen lässt. Die irreversiblen Prozesse zeigen es uns an.

Kartenspiel

Wir sind tatsächlich umgeben von sehr vielen irreversiblen Prozessen. Wenn wir Milch in den Kaffee tropfen lassen, dann verteilt sie sich im Kaffee. Wir haben aber noch nie gesehen, dass sie sich aus dem Kaffee heraus wieder zu einem Tropfen zusammenfügt. Ein Beispiel, auf das wir noch später zurückkommen werden, ist die Ausdehnung von Luft in einen Raum der vorher luftleer war. Ein zweites einfaches weiteres Beispiel, das wir noch näher diskutieren werden, ist das Mischen von Spielkarten. Die Spielkarten, die wir im Laden kaufen, sind sortiert. Sie liegen in einer wohl bestimmten Reihenfolge, so dass man schnell feststellen kann, ob der Satz vollständig ist. Jeder Spieler, der diese Karten mischt, wird davon ausgehen, dass er auch durch außerordentlich langes Mischen den sortierten Anfangszustand nicht wieder erreichen kann. Alle drei beschriebenen Vorgänge laufen von selbst immer nur in einer Richtung ab und definieren so „früher“ und „später“. Unser subjektives Zeitempfinden orientiert sich an diesen Vorgängen und spiegelt sie wieder.

Mischen überführt immer vom geordneten Zustand in den ungeordneten und nie wieder zurück. Man kann am Mischen den Ablauf der Zeit ablesen. Aber man kann am Beispiel des Mischens noch etwas anderes studieren und das führt auf ein Problem. Wir registrieren hierzu das Mischen. Wir nehmen den Satz Karten so wie wir ihn gekauft haben, nehmen nacheinander immer eine Karte ab und legen eine neben der anderen auf einen langen Tisch

aus. Anschließend bitten wir jemanden, nacheinander immer zwei Karten miteinander zu vertauschen. Während er das tut notieren wir, welche beiden Karten er beim ersten Vertauschen genommen hat und welche beim Zweiten usw. Wenn er sehr oft dieses Vertauschen durchgeführt hat, ist am Schluss ein perfekt gemischtes Kartenspiel entstanden. Auch weiteres Austauschen führt nicht in den geordneten Zustand zurück. Heißt das, es ist unmöglich durch Vertauschen wieder in den sortierten Zustand zurückzukommen? Im Gegenteil, es ist ganz einfach. Wir sagen dem Spieler, welche Vertauschungen er durch erneutes Vertauschen der jeweiligen zwei Karten rückgängig machen soll. Wir schauen hierzu in unserer Liste nach und beginnen mit der letzten notierten Vertauschung, führen dann die Vorletzte noch einmal durch usw. um schließlich beim perfekt sortierten Kartenspiel zu enden. Wir haben also durch Mischen den Übergang von dem Zustand „Kartenspiel gemischt“ in den Zustand „Kartenspiel sortiert“ rückgängig machen können.

Dieser zeitunggekehrte Vorgang ist daher nicht aus irgendeinem physikalischen Grund prinzipiell verboten. Warum beobachten wir ihn trotzdem nicht? Die Begründung ist: Der zeitunggekehrte Vorgang, dass der Spieler durch langes Mischen den Ausgangszustand erreicht, ist zwar möglich, aber er ist sehr unwahrscheinlich. Wir haben damit *Wahrscheinlichkeit* als ein neues Element in die Betrachtung eingeführt. Unter Begründen versteht man in der Physik die Zurückführung auf ein allgemeines ungreifendes Prinzip. Das Prinzip, das in der Statistischen Mechanik noch genauer ausformuliert wird, lautet: Die Natur versucht in ihren Prozessen den wahrscheinlichsten Zustand zu realisieren.

Was bedeutet das? Wir betrachten dazu noch einmal das Kartenspiel. Das Kartenspiel hat 52 Karten. Wir haben 2 Makrozustände: Sortiert und gemischt (unsortiert). Mit *Makrozustand* ist gemeint, dass wir bei „gemischt“ uns nicht dafür interessieren, wie im Einzelnen die genaue Reihenfolge der Karten aussieht. Dann sieht man, dass es nur

eine Realisierung des Makrozustandes „sortiert“ gibt. Wenn man es genauer ausrechnet gibt es aber ungefähr 10^{70} (eine 10 mit 70 Nullen) verschiedene Kartenanordnungen, die alle den einen Makrozustand „gemischt“ darstellen. Es gibt 10^{70} Möglichkeiten das gemischte Kartenspiel zu realisieren. Sie stellen jeweils einen anderen *Mikrozustand* dar. Wenn wir jetzt die Grundannahme machen, dass alle Mikrozustände (also jede spezielle Anordnung der Karten) jeweils gleich wahrscheinlich sind, dann haben die beiden Makrozustände sehr unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten. Die Folge ist, dass „gemischt“ extrem wahrscheinlicher ist als „sortiert“. Zugleich ist der Übergang „sortiert“ in „gemischt“ und „gemischt in gemischt“ extrem wahrscheinlicher als „gemischt in sortiert“. Wir werden diesen letzten Punkt noch näher veranschaulichen.

Mikro- und Makrozustände

Wir wollen als ein weiteres Beispiel die freie Ausdehnung eines Gases diskutieren. Zwischen Stempel und der Wand befindet sich ein Gas (*Abb. 1a*). Wir ziehen den Stempel nach hinten, dann sind im ersten Augenblick alle Gasteilchen immer noch im alten Raumbereich (*Abb. 1b*). Wenn wir ein bisschen warten, sind die Gasteilchen in einen anderen Zustand übergegangen. Sie füllen nämlich jetzt den ganzen Raum bis zum Kolben (*Abb. 1c*). Man kann natürlich durch einen äußeren Eingriff mit Hilfe des Stempels das Gas wieder auf seinen ursprünglichen Raumbereich zusammendrücken (*Abb. 1d*). Es hat aber niemand bisher beobachtet, dass die Teilchen dies von sich aus tun, dass also die in *Abbildung 1b* dargestellte Situation ohne äußere Einwirkung eintritt. Bei der Beschreibung des Vorgangs interessieren wir uns wieder nicht für die Lage des einzelnen Teilchens, sondern nur dafür, ob es sich in der linken Hälfte des

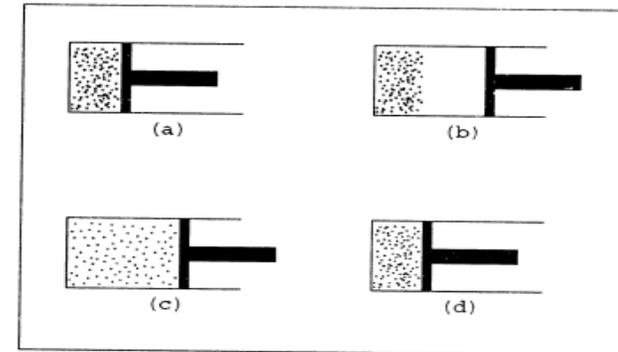


Abb. 1a-d: In einem Gefäß mit Kolben befindet sich ein Gas. Der Kolben wird rausgezogen und wieder reingeschoben.

Raums zwischen Stempel und Wand oder in der rechten Hälfte befindet. Der *Mikrozustand* beantwortet wieder die Frage: *Welche* der unterscheidbaren Teilchen sind links bzw. rechts? Der *Makrozustand* beantwortet die Frage: Wie viele Teilchen sind links bzw. wie viele sind rechts?

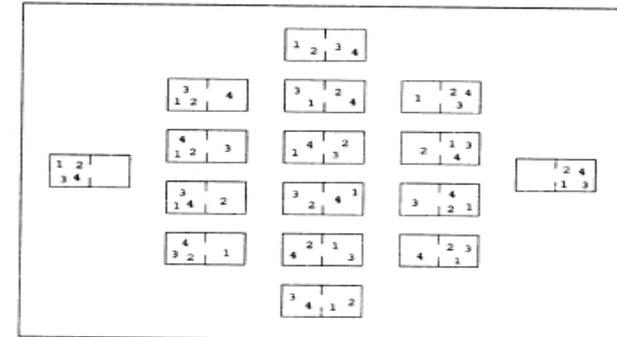


Abb. 2: Vier unterscheidbare Objekte werden jeweils mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf zwei Kästen verteilt. Mikrozustände zu gleichen Makrozuständen stehen untereinander. Makrozustände mit der größten Zahl der Mikrozustände werden am wahrscheinlichsten realisiert.

Wir wollen die verschiedenen möglichen Mikrozustände dadurch simulieren, dass wir Teilchen in einen Kasten legen. Dabei soll mit gleicher Wahrscheinlichkeit das erste Teilchen entweder in den linken oder den rechten Kasten gelegt werden. Anschließend wird das zweite Teilchen wieder mit Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ entweder in den linken oder den rechten Kasten gelegt und so fahren wir fort. Wir führen das am Beispiel von vier Teilchen in *Abbildung 2* durch. Wir halten uns dabei an unsere Spielregeln für die Verteilung, interessieren uns aber nur für die Frage, wie viele Teilchen sind im rechten bzw. im linken Kasten? Es kommt dabei nicht darauf an, welche der durchnummerierten Teilchen es sind. Wir fragen uns wieder wie beim Kartenspiel wie viele Möglichkeiten gibt es für die Realisierungen dieser Makrozustände? Es gibt offenbar nur eine Möglichkeit, dass alle vier Teilchen links sind. Wir sehen an der Abbildung, dass es vier Möglichkeiten dafür gibt, dass drei Teilchen links und ein Teilchen rechts sind. Das eine Teilchen kann die Nummer 1 oder 2 oder 3 oder 4 haben, die anderen drei Teilchen sind dann jeweils in der anderen Hälfte. In analoger Weise stellt man fest, dass es sechs Kombinationen gibt, in denen zwei Teilchen in der linken und zwei Teilchen in der rechten Hälfte sind. Das geht so weiter. Schließlich sehen wir, dass es nur wieder eine Möglichkeit gibt, dass alle vier Teilchen in der rechten Hälfte sind. Wir haben fünf verschiedene Makrozustände gefunden. Alle kleinen Kästen kommen bei der Verteilungsspielregel mit gleicher Wahrscheinlichkeit vor. Da der Makrozustand „2 links, 2 recht“ die meisten Realisierungsmöglichkeiten durch Mikrozustände hat, ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass dieser Makrozustand statt des Makrozustands „alle rechts“ vorgefunden wird.

Wir können die ganze Prozedur auch noch einmal mit fünf Teilchen wiederholen (*Abb. 3*). Wir beginnen mit fünf Teilchen im linken Kasten. Dann nehmen wir ein Teilchen heraus. Das führt auf die fünf verschiedenen Mikrozustände

der zweiten Säule. Davon ausgehend haben wir sehr viele Möglichkeiten noch ein weiteres Teilchen herauszunehmen. Sie sind alle in der dritten Säule dargestellt usw. Es ist sehr unwahrscheinlich, fünf Teilchen im rechten Kasten oder

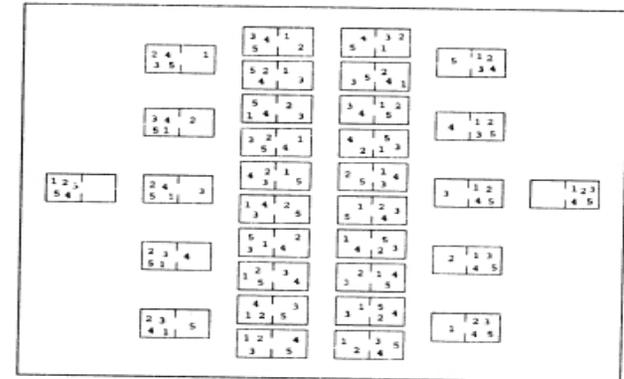


Abb. 3: Fünf unterscheidbare Objekte werden jeweils mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf zwei Kästen verteilt. Mikrozustände zu gleichen Makrozuständen stehen untereinander. Makrozustände mit der größten Zahl der Mikrozustände werden am wahrscheinlichsten realisiert.

fünf Teilchen im linken Kasten zu finden. Sehr häufig findet man drei Teilchen in einem und zwei Teilchen im anderen Kasten. Das sind die beiden Makrozustände in der Mitte.

Je mehr Teilchen man hat, umso wahrscheinlicher werden gewisse Makrozustände. Man vergleiche *Abbildung 2* und *3*. Wenn man sehr viele Teilchen zu verteilen hat, ist es sehr unwahrscheinlich, dass man alle im linken Kasten oder alle im rechten Kasten findet. Hingegen ist es sehr wahrscheinlich, dass die Zahl der Teilchen im rechten Kasten gleich der im linken Kasten ist oder um eins differiert. Mit wachsender Teilchenzahl gehört die überwältigende Zahl der Mikrozustände zum Makrozustand mit Gleichverteilung. Abweichungen von diesem Makrozustand sind nicht verboten, aber

unwahrscheinlich und daher selten realisiert. Das bedeutet: Wenn man einen dieser Kästen im verschlossenen Zustand erhält, kann man jede Wette eingehen, dass sich bei der Öffnung des Kastens zeigt, dass sich nahezu gleich viele Teilchen im linken wie im rechten Unterkasten sich befinden. Wer etwas anderes wettet kann durchaus auch gewinnen, aber das ist sehr unwahrscheinlich.

Als Maß für die Wahrscheinlichkeit kann man die Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten sehen. Der Logarithmus in der Zahl Z der möglichen Mikrozustände, der mit S ansteigt, ist direkt der Entropie S proportional.

$$S = k \ln Z.$$

Dabei ist $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Joule pro Grad Kelvin die Boltzmann-Konstante. Bei Systemen mit vielen Teilchen erwartet man, dass der wahrscheinlichste Zustand, also der mit größter Entropie, vorliegt.

Richtung von Prozessen

Soviel zur Frage: Was findet man mit der größten Wahrscheinlichkeit vor? Jetzt wollen wir aber noch untersuchen, in welchen Zustand hinein sich ein vorgegebener Zustand entwickelt? Die Gerichtetheit kann man sich in genau derselben Weise wie oben klarmachen. Unter Gerichtetheit verstehen wir dabei den Übergang zwischen Makrosystemen. Für Diskussionen des Modells eines zeitlichen Ablaufs betrachten wir wieder einen unserer Kästen (vgl. Abb. 4). Er soll fünf Teilchen enthalten. Im Ausgangszustand sind vier Teilchen im linken Kasten und ein Teilchen im rechten. Die Spielregel lautet jetzt, dass ein Teilchen die Seiten wechseln darf. Es ist dabei gleichgültig um welches der Teilchen es sich handelt. Dabei soll es gleich wahrscheinlich sein, dass ein Teilchen aus der linken Kammer in die rechte geht oder ein Teilchen aus der rechten Kammer in die linke geht.

Das Wechseln von einem Kasten in den anderen ist immer gleich wahrscheinlich, egal welches Teilchen wechselt. Bei diesem Ausgangszustand gibt es genau eine Möglichkeit, dass ein Teilchen von rechts nach links wechselt. Es gibt aber vier Möglichkeiten, dass eines der Teilchen 1 bis 4 nach rechts geht. Man sieht: Wenn man den Prozess mit dem gleichen Anfangszustand häufig wiederholt, findet sich

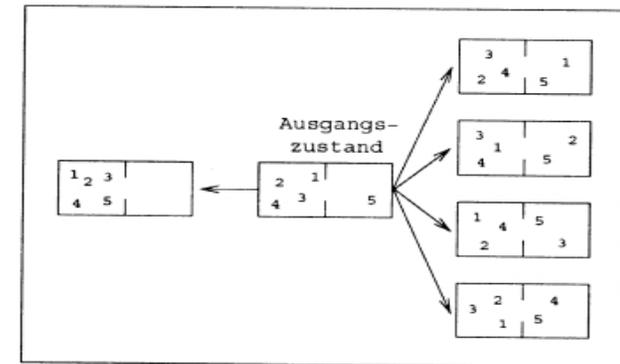


Abb. 4: Vom Ausgangszustand aus wechselt eines der unterscheidbaren Objekte in den Nachbarkasten. Es gibt vier Möglichkeiten dabei den Makrozustand „zwei im rechten Kasten“ zu realisieren und nur eine Möglichkeit für „fünf im linken Kasten“. Der rechte Makrozustand wird mit größerer Wahrscheinlichkeit realisiert.

in 20 % der Fälle die linke Situation und in 80 % der Fälle eine Situation ergeben, in der im rechten Unterkasten sich zwei Teilchen befinden. Vier Typen von Mikrozuständen gehören zu diesem einen Makrozustand. Es gibt daher mehr Möglichkeiten in Richtung auf einen Makrozustand mit Gleichverteilung. Es ist sehr viel wahrscheinlicher, dass der Prozess in dieser Richtung abläuft statt in Richtung auf einen Makrozustand, der nur wenige Mikrorealisierungen hat. Die Makrozustände mit den meisten Mikrozuständen sind die Zustände mit der größten Entropie.

Wir haben abgeschlossene Systeme betrachtet. Es lag also kein Eingriff von außen, wie z. B. das Zurückschieben des Stempels in *Abbildung 1* vor. Wir haben gesehen, dass für solche Systeme gilt, dass Prozesse spontan (von sich aus) vom Zustand geringer Wahrscheinlichkeit in den Zustand maximaler Wahrscheinlichkeit ablaufen. Das gibt genau den 2. Hauptsatz der Thermodynamik wieder: In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie nie ab. Bis auf kleine Schwankungen bleiben die Systeme dann in dem Zustand maximaler Wahrscheinlichkeit. Das spiegelt gerade die Irreversibilität (Nichtumkehrbarkeit) wieder. Prozesse in abgeschlossenen Systemen sind gerichtet. Mit der Prozessrichtung verknüpfen wir die Richtung des Ablaufs der Zeit. Die Systeme laufen in den wahrscheinlichsten Zustand rein, aber nicht wieder raus. Sie können aber darum schwanken.

Offene Systeme

Wir haben uns davon überzeugt, dass immer der wahrscheinlichste Zustand angenommen wird. Wie ist es dann möglich, dass zum Beispiel der Leser dieser Zeilen sich offenbar in einem sehr unwahrscheinlichen Zustand befindet und nicht etwa in Atome zerlegt gleichmäßig im Zimmer verteilt ist? Auch das wachsende Kind wächst nicht in einen wahrscheinlichen sondern in einen sehr unwahrscheinlichen Zustand hinein. Sein Gesicht zum Beispiel wird es, wenn es kein Zwilling ist, nur einmal auf der Welt geben. Steht das im Widerspruch zu dem was wir oben festgestellt haben?

Alle unseren bisherigen Betrachtungen haben sich auf abgeschlossene Systeme bezogen. Schon das Beispiel des zurückgeschobenen Stempels von *Abbildung 1* zeigt, dass sehr wohl durch Einfluss der Umgebung ein System in einen unwahrscheinlichen Zustand übergehen kann. Ein

offenes System kann man abschließen, in dem man seine Umgebung mit zum System nimmt und das neue Gesamtsystem abschließt. Die Entropie kann in einem offenen System auch abnehmen, solange die Umgebung genügend Entropie aufnimmt, so dass das abgeschlossene Gesamtsystem wieder allenfalls zunehmende Entropie hat. Das heißt, als der Leser aufgewachsen ist, war er offenbar kein abgeschlossenes System. Darüber hinaus muss er sich in einer günstigen Umwelt befunden haben. Die Umwelt musste nämlich so beschaffen sein, dass sie noch eine Entropiezunahme verkraften konnte. Zu Lasten der Umwelt und unter Vergrößerung von deren Entropie konnte der Leser in einen hoch geordneten Zustand übergehen.

Man sieht auch wodurch das letztlich ermöglicht wird: Durch die Fotosynthese können Pflanzen wachsen, weil es eine heiße Sonne und ein kaltes Weltall gibt. Bei einer völlig abgekühlten Sonne wäre kein Leben möglich gewesen. Unsere Entropieabnahme war nur möglich, weil das abgeschlossene Gesamtsystem einschließlich der Sonne noch die Möglichkeit der Entropiezunahme hatte. Die Sonne, wie wir sie kennen, ist in einem extrem unwahrscheinlichen Zustand und entwickelt sich in einen wahrscheinlichen. Die astrophysikalischen Einzelheiten dieses Prozesses wollen wir hier nicht beschreiben. Das Sonnensystem selber ist ebenfalls in einem extrem unwahrscheinlichen Zustand. Hier kann die Entropie noch zunehmen. Das Sonnensystem wiederum ist deshalb in diesem extremen unwahrscheinlichen Zustand, weil die Strukturbildung in kosmologischer Frühzeit stattfinden konnte. Der kosmologische Frühzustand musste daher ein sehr unwahrscheinlicher Zustand gewesen sein. Wenn der kosmologische Frühzustand ein Zustand gewesen wäre, in dem schon das Gleichgewicht vorhanden war, dann hätte nichts mehr passieren können. Es wären Schwankungen aufgetreten, aber die Entwicklung wäre wieder zurück zum Gleichgewicht erfolgt. Dadurch jedoch, dass die Möglichkeit bestand, vom unwahrscheinlichen zum

wahrscheinlichen Zustand überzugehen, konnte in kleinen Inseln das Umgekehrte passieren.

Ein unwahrscheinlicher Anfang

Unsere Beobachtung einer Gerichtetheit der physikalischen Prozesse weist auf einen Ablauf der Welt hin. Einem Ablauf aus dem unwahrscheinlichen Zustand in den wahrscheinlichen Zustand. Wir können sehr zufrieden damit sein, dass der heutige Zustand der Welt immer noch ein sehr Unwahrscheinlicher ist. Wir haben also noch viel Potential, dass irgendwo irgendetwas unter Entropiezunahme in den wahrscheinlicheren Zustand übergehen kann, damit unter Entropieabnahme hier noch viel entstehen kann.

Das Beschriebene scheint in doppelter Hinsicht theologisch relevant zu sein: Es gibt einen Ablauf des menschlichen Lebens, der am Ende in den wahrscheinlichsten Zustand überführt, gewissermaßen „Staub zu Staub“. Der andere Aspekt ist, dass der Ablauf der Welt aus einem *extrem unwahrscheinlichen* Frühzustand („Anfang“) heraus erfolgt sein muss. Das hat Strukturbildung ermöglicht von Galaxien über Sonnensysteme bis zum Leser dieser Zeilen.
