

Der Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ist für uns Wissenschaftler eine Illusion, wenn auch eine hartnäckige.

Albert Einstein (1879–1955)

Liebe Leserin, lieber Leser,

in der Septemбераusgabe war von H. G. Wells' „Zeitmaschine“ (1895) die Rede gewesen, diesmal ist an Wells' Bestseller aus dem Jahre 1898 zu erinnern. Vor 80 Jahren nämlich, zu Halloween 1938, sorgte eine Hörspielfassung von „Krieg der Welten“ mit Orson Welles (1915–1985) in einigen Bundestaaten der USA für öffentliche Aufregung. Die fingierte Rundfunkreportage über eine Invasion vom Mars klang echt! Fake News *à la* 1938.

Uns interessiert nach wie vor, warum es eine ausgezeichnete Zeitrichtung gibt, obwohl alle physikalischen Elementarvorgänge zeitumkehrbar sind. Der thermodynamische Zeitpfeil, von dem bereits die Rede war, er entsteht aus Unkenntnis des Details. Man gibt sich mit Summen und Mittelwerten zufrieden, wobei Information verloren geht. Der Komplexitätsforscher Murray Gell-Mann (geb. 1929) unterscheidet zwischen „feinkörnigen“ und „grobkörnigen“ Schilderungen der Wirklichkeit. Bei ersteren existiert kein Zeitpfeil, alles liegt von Anbeginn an fest. Das träfe, so der Quantenphysiker, auch bei quantenphysikalischer Betrachtung zu. Die Asymmetrie zwischen Vergangenem und Zukünftigem ergäbe sich, operiert man mit weniger Größen als zu einer exakten Beschreibung notwendig wären. Die Zunahme der Entropie (Unordnung, informationstheoretische Ungewissheit) mit der Zeit ist einer „grobkörnigen“ Beschreibung geschuldet, der nichts an Feinheiten (Detailtreue) gelegen ist.

Filmte man ein komplexes Geschehen, wie z. B. das Eindringen eines Elephanten in einen Porzellanladen, mit extrem hoher Auflösung, atomarer, so würde man bei der Fixierung auf einen x-beliebigen winzigen Ausschnitt keinen Unterschied bemerken, liefe der Film rückwärts. Bei Betrachtung des Gesamtbildes hingegen ist klar, in welcher Reihenfolge sich das Geschehen abgespielt haben muss.

Diesmal soll es um den „kosmologischen Zeitpfeil“ gehen. Das Thema erweist sich als umfänglicher als gedacht. Es wird daher einer weiteren Fortsetzung

bedürfen, bevor wir uns der Frage widmen, was man von Zeitreisen, insbesondere solchen in die Vergangenheit, zu halten hat.

Für die Verspätung bei der Oktoberausgabe bittet um Entschuldigung
Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Oktober

Venus zieht am 26. Oktober südlich an der Sonne vorbei. Aus dem Abend wird der Morgenstern. In der Übergangszeit ist sie nur tagsüber sichtbar. Wegen ihrer Erdnähe – 41 Millionen Kilometer trennen uns von ihr – erscheint sie mit rund einer Bogenminute Durchmesser besonders groß. Allerdings präsentiert sie uns ihre Nachtseite.

Mars bleibt uns als Planet am Abendhimmel noch eine Weile erhalten. Er strebt nordwärts und geht gegen MEZ-Mitternacht unter. Jupiter hingegen verabschiedet sich im Oktober vom Abendhimmel, Saturn erst Anfang Dezember. Er ist abends noch tief im SW auszumachen. Ende des Monats geht er bereits 20 Uhr MEZ unter.

Am 28. Oktober endet die Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ).

Chaos und thermodynamischer Zeitpfeil

Bevor wir uns dem Oktober-Thema, dem kosmologischen Zeitpfeil, zuwenden, ein kleines Rechenexempel, das zeigt, wie man trotz Unkenntnis, aber dank einer plausiblen Annahme zu einer quantitativ genauen Aussage gelangt, sofern die Anzahl der agierenden „Teilnehmer“ nur groß genug ist.

Angenommen, alle 1000 Moleküle eines Parfums halten sich zunächst in der linken Hälfte eines Gefäßes auf, das durch eine Trennwand in zwei Bereiche geteilt wurde. Energetisch mache es keinen Unterschied, wo sich so ein Molekül befinde, ob in der linken oder der rechten Hälfte. Nun wird die Trennwand entfernt, und man soll raten, wieviele Moleküle sich zukünftig, d. h. nach einer angemessenen Wartezeit, in der linken Hälfte aufhalten werden. In Unkenntnis dessen, was sich im Einzelnen abspielt, wird ein Physiker die Wahrscheinlichkeitsrechnung bemühen. Er geht davon aus, einem Parfummolekül sei es egal, in welcher Hälfte es sich befindet, und wettet entsprechend 999 : 1, dass sich nach erfolgter Durchmischung in der linken Hälfte zwischen

446 und 550 Moleküle aufhalten werden. Nur in einem von Tausend Fällen irrt er mit seiner Vorhersage! Übrigens: Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zufällig alle 1000 Moleküle in einer Hälfte aufhalten, liegt bei 10^{-301} . So unwahrscheinlich war der Anfangszustand! Dass er sich spontan irgendwann wieder einstellt, grenzte an ein Wunder.

Genau genommen ist der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, wonach die Entropie im Laufe der Zeit zunimmt, nichtssagend, eine Tautologie, wie einige meinen. Er besagt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit eintritt, was eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit hat. Das trifft gleichermaßen auf Vergangenes zu: Auch früher sollte, im Gegensatz zu unserer Alltagserfahrung, die Entropie höher gewesen sein! Joseph Loschmidt (1821–1895) hat 1876 Ludwig Boltzmann (1844–1906) auf diesen Umstand hingewiesen. Der kontrerte mit dem Hinweis, seltene Zustände niedriger Entropie seien nicht verboten, sondern eben nur selten. Boltzmann blieb nichts anderes übrig, als zu behaupten, das Universum, von dem man damals annahm, es sei ewig, befände sich just heuer zufällig in einem Zustand hochgradiger Ordnung, also niedriger Entropie. Von nun an ginge es mit statistischer Sicherheit dem *W ä r m e t o d*¹ entgegen. Tatsächlich wäre die spontane Vernichtung produktiver Unterschiede, wie Temperatur- und Konzentrationsgefälle, gleichbedeutend mit dem Erschlaffen jeglicher Aktivität, dem Tod. Doch der Physiker hatte die Rechnung ohne die Gravitation gemacht.

Heutzutage wird der thermodynamische Zeitpfeil, die offenkundige Irreversibilität (Unumkehrbarkeit) in der Welt, dem *d e t e r m i n i s t i s c h e n C h a o s*² angelastet. Der sog. „Schmetterlingseffekt“ geht zurück auf den Mathematiker, Physiker und Astronomen Henri Poincaré (1854–1912), der kurz vor 1900 feststellte, es könne „vorkommen, dass kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen schließlich große Unterschiede in den Phänomenen erzeugen. Ein kleiner Fehler zu Anfang wird später einen großen Fehler zur Folge haben. Vorhersagen werden unmöglich, und wir haben ein zufälliges Ereignis.“ Dieser deterministische Zufall ist von wirk-

¹Die Redewendung „Wärmetod des Weltalls“ geht vermutlich auf den Potsdamer Hermann von Helmholtz (1821–1894) zurück.

²Bei Quantensystemen, denen diese Art von klassischem Chaos fremd ist, funktioniert Zeitumkehr bei sog. „Loschmidt-Echo-Experimenten“ in der Tat besser als im Falle klassischer Mehr-Teilchen-Systeme. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass sich Wellen für Zeitspiegelungsexperimente besser eignen als Teilchen. Akustiker können im Labor Schallwellen mittels aktiver „Zeit-Umkehr-Spiegel“ quasi in die Vergangenheit zurückschicken. Die Welle läuft, an Intensität gewinnend, zum Ausgangspunkt zurück. Mediziner zertrümmern „durch Zeitumkehr“ akustisch Nieren- und Gallensteine!

lichem Zufall nicht zu unterscheiden. Das Element des Zufälligen aber untergräbt die Reversibilität. Zeitumkehr wird praktisch unmöglich.

Kosmologischer Zeitpfeil

Statt Niedergang und Abbau verwertbarer Unterschiede ist die Welt, zumindest hienieden, im Laufe der Zeit immer bunter geworden. Statt Eintönigkeit herrscht Vielfalt. Die Photosynthese hält erfolgreich seit Jahrmilliarden die Lufthülle fern vom chemischen Gleichgewicht³. Immer wieder kommt es zu Berg-und-Tal-Bildung trotz Erosion, immer wieder bilden sich Lagerstätten – und das entgegen dem allgemeinen Trend, der durch den 2. Hauptsatz (HS) der Thermodynamik vorgezeichnet ist. Die Erde ist noch nicht erkalteet. In ihrem Innern rumort es. Nicht zu vergessen die geistige Welt, die auf Wort und Schrift beruht. Auch sie wird immer komplexer und treibt so ihre Blüten. All das steht nicht im Widerspruch zum 2. HS, der nur summarisch für ein abgeschlossenes System gilt. Wir haben schon des Öfteren darauf hingewiesen: Alles „Höhere“ wird mit Entsorgung von Entropie, also Abwärme und Umweltverschmutzung (Mischungsentropie⁴), erkauft, aber die solcherart anfallende Entropie stört (bisher) nicht, sie verpufft als Infrarotstrahlung ins All, weil das Universum kälter ist als die Erde. Es wird sogar täglich kälter, weil es *e x p a n d i e r t*! Die „Außentemperatur“ von derzeit 2,7 K (Hintergrundstrahlung!) fällt, statt zu steigen. Das heißt, die „Entropiemüllhalde“ Universum wächst schneller, als sie die diversen entropieerzeugenden Vorgänge zu füllen vermögen. (Der für uns und den Planeten wichtigste irreversible Vorgang ist die Entwertung der Sonnenenergie.) Das sind beste Bedingungen für eine technisch-fortgeschrittene Zivilisation! Kosmisch gesehen, hätte der *Homo oeconomicus* also durchaus eine Zukunft. Er müsste dazu nur, um eine Überhitzung⁵ der Erde zu vermeiden, die Produktion ins All verlegen.

Wir halten fest: Die *E x p a n s i o n*, ein gravitativer Effekt, bringt den *k o s -*

³Bei der Suche nach Leben im All kann man sich auf Planeten beschränken, deren Atmosphären aus dem chemischen Gleichgewicht sind. Ausgesprochene Biomarker sind Sauerstoff, Ozon, Methan, Stickoxide etc.

⁴Die Abwasserreinigung – eine Entmischung! – ist energieaufwändig und stellt im kommunalen Haushalt einen gehörigen Posten dar.

⁵Die Erde wird die im Produktionsprozess anfallende entwertete Energie (Abwärme) prinzipiell nur durch höhere Oberflächentemperatur los, was auf Dauer niemand will.

m o l o g i s c h e n Zeitpfeil hervor.

Der Denkfehler der Thermodynamiker des 19./20. Jh. war, dass sie die Schwerkraft außen vorgelassen hatten. Schon Rudolf Clausius (1822–1888) schwante, dass die Einbeziehung der Gravitation alles ändert: (1) Ein statisches Universum wird durch sie unmöglich (was bereits Newton hätte wissen können). Und solange das Universum expandiert gibt es auch keinen „Wärmetod“! (2) Entgegengesetzt zu dem, was man ohne Gravitation erwartet, ist nicht Gleichverteilung, sondern Klumpigkeit gepaart mit (geordneter⁶ bzw. ungeordneter⁷) Bewegung der wahrscheinlicheren Zustand. Es kommt noch schlimmer: (3) Für selbstgravitierende „Klumpen“, wie Sterne, Sternhaufen, Galaxien und Galaxienhaufen gibt es keinen Zustand maximaler Entropie. Die gravitative Selbstverdichtung⁸ der Materie – Stern, weißer Zwerg, Neutronenstern –, sie endet zwar mit dem schwarzen Loch, doch die Entropieproduktion geht weiter: Beim Verschmelzen von schwarzen Löchern kann sich die Entropie im Extremfall schlagartig verdoppeln!

Diktiert der Trend zum schwarzen Loch die Richtung des kosmischen Zeitflusses? Bekanntlich schreddern sie Information im großen Stil. Wir erinnern uns: Drei Zahlenangaben⁹ reichen, ein schwarzes Loch e r s c h ö p f e n d zu beschreiben: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung! Der übergewichtige Stern, der zu einem schwarzen Loch kollabierte, und die Dinge, welche danach in ein solches Loch hineinfallen, haben aber (sofern es sich nicht selbst um ein schwarzes Loch handelt) einen vergleichsweise hohen Informationsgehalt. Und dennoch: Dem schwarzen Loch ist nicht anzusehen, was es verschluckt hat. Ob Trabi oder Mercedes, es zählen Masse und Drehimpuls, nicht Komplexität.

Nach Auskunft der 3-K-Strahlung war 380 000 Jahre nach dem ominösen Urknall, gegen Ende des Feuerballstadiums, der Stoff hochgradig homogen

⁶Rotationsbewegung der Spiralgalaxien

⁷„thermische“ Bewegung der Sterne in Kugelsternhaufen und E-Galaxien

⁸Man beachte das Phänomen der gravitativen Selbstaufheizung! Sterne und Sternansammlungen stellen Gebilde mit n e g a t i v e r Wärmekapazität dar. Entzieht man ihnen Energie durch Abstrahlung, werden sie heißer! Gravitative Instabilität generiert Temperaturunterschied! Bei gravitativ gebundenen Sternhaufen äußert sich dies in einer Erhöhung der Individualgeschwindigkeiten. Die schnellsten Sterne verlassen gar den Haufen. Die zunehmende Verdichtung im Zentrum, beispielsweise eines Kugelsternhaufens, führt zum „Verdampfen“ des Haufens.

⁹Erforderte die Beschreibung eines schwarzen Loches mehr als drei Zahlenangaben, wäre Einsteins Theorie erledigt! Merkmal einer guten Theorie ist ihre Falsifizierbarkeit. So gesehen, epistemologisch, ist die ART eine s e h r angenehme Theorie. Viele Theorien entziehen sich der Falsifikation durch immer neue Ausreden, warum sie ggf. nicht zutreffen.

verteilt und bei einer Temperatur von etwa 3000 Grad im thermischen Gleichgewicht mit der Strahlung. Das sieht nach einem Zustand maximaler Einfachheit aus, reine Wärme, maximale Entropie. Und dennoch war dies nicht das Ende, sondern der Anfang einer grandiosen Entwicklung. Wie das? Der Wasserstoff bildete beim Unterschreiten der 3000 Grad elektrisch neutrale Atome und löste sich damit vom Strahlungsfeld. Man spricht von Entkopplung. Stoff und Strahlung gingen getrennte Wege. Durch die Expansion kühlte sich der Stoff (bei homogener Verteilung) schneller ab als die Strahlung, was eine ständig anwachsende Temperaturdiskrepanz nach sich zieht. Die Entwicklung zielt also mitnichten auf ein thermisches Gleichgewicht, sondern aufs Nichtgleichgewicht! Durch die andauernde räumliche Expansion bleibt die durch Ausgleichsvorgänge (kosmische Strukturbildung, Sternstrahlung¹⁰, etc.) tatsächlich verursachte „Unordnung“ weit hinter dem zurück, was an Unordnung in einem ständig größer werdenden Universum prinzipiell möglich wäre. Bezogen auf diese denkbare Unordnung (maximale Entropie) wird das Universum (relativ) ordentlicher, was Spielraum für's Schöpferische eröffnet! Was aber, wenn das Universum eines fernen Tages wieder in sich zusammenfiel, weil es die Fluchtgeschwindigkeit um ein Winziges verfehlte? Kehrt sich dann der kosmologische Zeitpfeil wieder um? Das sind müßige Spekulationen. Wie es z. Z. aussieht, expandiert das Universum sogar beschleunigt, man spricht vom „Big Rip“, dem großen Zerreißen. Von einem „Big Crunch“ am Ende der Tage, der Umkehrung des „Big Bang“, spricht niemand mehr.

Unmittelbar nach dem Urknall war das Universum, jedenfalls aus Sicht der Gravitation, in einem sehr speziellen Zustand. Durch die kosmologische Inflation waren Schwankungen im Schwerfeld (Krümmungsschwankungen der Raum-Zeit) so gut wie weggebügelt worden. Das Universum blähte sich, bzgl. jedes fiktiven Punktes, *e x a k t* mit der Entweichgeschwindigkeit auf, der

¹⁰Der für uns wichtigste kosmische Ausgleichsvorgang findet in der Sonne und zwischen Sonne und kaltem Universum statt. Die Zentraltemperatur wird durch Kernfusion für eine Weile konstant gehalten. Abgesehen von der geheizten Zentralregion ist der Rest des Sterns eine gigantische Hülle aus Wärmedämmung. Dämmung ist keineswegs passiv: Sie produziert Entropie! (Jede Hauswand produziert Entropie, sofern es draußen kälter als drinnen ist. Verminderung dieser Entropieproduktion ist der Sinn des Häusledämmens.) Die entropiearme, Millionen Grad heiße Strahlung aus dem Zentrum verlässt die Sonne als entropiereiche kalte Strahlung, wenn man 6000 Grad im Vergleich zu 16 Millionen Grad als kalt bezeichnen darf. Für uns sind die 6000 Grad übrigens heiß und entropiearm genug, um alle Lebens- und Wirtschaftsprozesse auf unserem Planeten mit Energie niedriger Entropie aufrechtzuerhalten, weil es draußen, im Weltenraum, noch kälter ist (3 K). Die Erde wird die entwertete Sonnenenergie wieder los.

2. Kosmischen Geschwindigkeit. Die aller kleinste Abweichung von diesem Expansionsgesetz *à la* Hubble hätte dazu geführt, dass das Ganze bereits binnen kurzem wieder in sich zusammengefallen bzw. so schnell auseinander gestiebt wäre, dass sich keine Strukturen, wie Sterne, Galaxien etc., hätten bilden können.

Während Boltzmann noch davon ausgehen musste, in einem ewigen Universum sei es zufällig zu einer bedeutenden Fluktuation gekommen, welche die niedrige Entropie beschert habe, von der jetzt noch alles zehrt, ist für heutige Kosmologen der Urknall der Ausgangspunkt. Wie ordentlich bzw. wie unwahrscheinlich war „unser“ Big Bang? Man stößt auf bizarre Zahlenungetüme. Sir Roger Penrose (geb. 1931), der Doktorvater von Stephen Hawking (1942–2018), beziffert die Anfangs(un)wahrscheinlichkeit auf $1 : (10^{10})^{123}$! Der enorme entropische¹¹ „Druck“, der Drang, an Wahrscheinlichkeit zu gewinnen, d. h. unordentlicher zu werden, treibt seitdem das „kosmische Räderwerk“ und erzeugt beiläufig, woran wir uns erfreuen: Leben und Shoppen.

Ausweg Multiversum?

Der kosmologische Zeitpfeil (und unsere Existenz) nötigt uns, von einem sehr speziellen und total unwahrscheinlichen Anfang auszugehen. Das ist unbefriedigend. Natürlich könnte man das Anthropische Prinzip bemühen und argumentieren, das sei kein Wunder, ein etwas anders geartetes Universum mit einem etwas anderen Werdegang hätte eben keine Wesen hervorbringen können, die über Zeit und Zeitpfeile nachdenken. Der Erklärungswert einer solchen Argumentation ist allerdings umstritten.

Die Viele-Welten-Interpretation der Quantenphysik aus dem Jahre 1957 eröffnet hingegen eine neue Sicht auf die Frage, wie es aus zeit-symmetrischen Gesetzen zur Asymmetrie zwischen dem Gestern und dem Morgen hat kommen können. Der Zeiterforscher und Sachbuchautors Paul Davies (geb. 1946) spekuliert wie folgt: Man gehe von einem Ensemble von denkbaren Universen aus! Jedes Parallel-Universum habe seine eigene Geschichte, sei sie kurz oder lang. Für das Ensemblemittel kann es dann aus Symmetriegründen keinen Zeitpfeil geben, aber jeder Einzelfall, jedes spezielle Universum, verfügt

¹¹Man kennt das von einem Gummiband. Ein maximal gespanntes Gummiband hat nur eine Möglichkeit, die Moleküle anzuordnen – in einer Linie. Ein entspanntes Band deren viele. Die Natur bevorzugt letzteres. Die fühlbare Gummispannung ist Beispiel einer entropischen Kraft, des Bedürfnisses, wahrscheinlicher zu werden!

über seinen eigenen Zeitpfeil. Die Pfeilrichtung mag unter Umständen, etwa beim Übergang von der kosmologischen Expansion zur Kontraktion, sogar wechseln.

Wird fortgesetzt!