

Woher nehmen wir die Zeit?

Im Glücksspiel des Lebens wird jeder Augenblick zum Hauptgewinn.

Von Michael Springer

»Stützt sich die Sonne auf des Abgrunds Schwingung, als reines Werk der ewigen Bedingung wird Zeit zum Glanz und Traum zur Wissenschaft«

Paul Valéry,
Der Friedhof am Meer

Wir alle wissen, wie die Zeit vergeht. Was jetzt ist, wird gleich vorbei sein und lässt sich dann nicht mehr ändern.

Was als Zukunft auf uns zukommt, ist ungewiss. Nur: Was ist das, was da kommt und geht? Würde nichts sich ändern, bliebe die Zeit stehen; würde immerfort alles anders, gäbe es nur Momente ohne Zusammenhang. Darum sagt man: Die Zeit fließt. Aber was fließt da? »Der Zug der Zeit ist ein Zug, der seine Schienen vor sich herrollt. Der Fluss der Zeit ist ein Fluss, der seine Ufer mitführt«, schreibt Robert Musil. Nichts als Metaphern und Paradoxien. Solange es um das Wesen der Zeit geht, sind wir keinen Deut klüger als der spätantike Kirchenvater Augustinus: »Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich es; will ich es jemandem, der danach gefragt hat, erklären, weiß ich es nicht.« Besser, wir fragen nicht nach dem Wesen. Fragen wir lieber: Was tun wir, wenn uns jemand nach der Zeit fragt? Wir schauen auf die Uhr.

Stellen wir also bescheiden fest: Zeit ist das, was Uhren messen. Seit jeher liefert die zyklische Wiederkehr des gleichen Vorgangs ein Zeitmaß – der Wechsel der Jahreszeiten, die Wiederkehr von Tag und Nacht. Der Stand des Schattens auf der Sonnenuhr zeigt die Tageszeit. Wenn wir eine große Sanduhr so eichen, dass sie von einem Sonnenaufgang zum nächsten exakt 24 Mal umgedreht werden muss, haben wir eine Stundenuhr. Ein Pendel schwingt periodisch und bewegt einen Zeiger, der die Minuten zählt.

Wir müssen Pendeluhren aber hin und wieder »aufziehen«, das heißt das Uhrgewicht, das über eine einfache Mechanik die Reibungsverluste ausgleicht, wieder gegen die

Schwerkraft hinaufbefördern. Im Alltag sind wir gewohnt, dass eine Bewegung ohne Antrieb mit der Zeit erlahmt. Darum postulierte die mittelalterliche Physik, jede irdische Bewegung komme von selbst zum Stillstand, weil der »Impetus«, den zum Beispiel eine Kugel durch einen Stoß erhalte, mit der Zeit aufgezehrt würde. Nach dieser Theorie steigt eine Kanonenkugel in der verlängerten Richtung des Kanonenrohrs geradlinig empor, bis sie ihren Impetus verliert und lotrecht zu Boden plumpst. Ungebremste, »ewige« Bewegungen gab es nur am Himmel als vollkommene Kreisbahnen. Erst die neuzeitliche Mechanik schuf mit Galileis Trägheitsprinzip, wonach jede kräftefreie Bewegung sich beliebig lange gleichförmig fortsetzt, die große Vereinigung von irdischer und himmlischer Physik.

Damit beginnt die Erfolgsgeschichte der modernen Naturwissenschaft – und zugleich entsteht das Problem, welche Rolle der Zeit darin zufällt. Die Newton'sche Mechanik beschreibt mit denselben Gesetzen Planetenbahnen und irdische Wurfparabeln. Der Preis dieses Erfolgs ist die Unanschaulichkeit der Newton'schen Physik: Sowohl das Trägheitsprinzip als auch das Gravitationsgesetz waren seinerzeit ähnlich arge Zumutungen wie heutzutage die seltsamen Regeln der Quantenphysik. Eine Bewegung, die ohne Krafteinwirkung bis in alle Ewigkeit weitergeht – wie im Himmel also auch auf Erden und noch dazu schnurgerade –, war für das mittelalterliche Bewusstsein ein Skandal. Und auf die Frage, welcher konkrete Mechanismus mit Stoß, Zug oder Druck sich denn nun hinter der augenblicklich über astronomische Distanzen wirkenden Schwerkraft verberge, gab Newton bloß die trotzigste Auskunft: Hypothesen erfinde ich nicht.

Newtons dynamisches Grundprinzip sagt: Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Letztere

ist die zweite Ableitung des Wegs nach der Zeit t . Wenn man t durch $-t$ ersetzt, ändert sich nichts an der Formel, denn minus mal minus ergibt plus. Darum ist die Newton'sche Physik invariant gegen Zeitumkehr. Jeder Vorgang kann ebenso gut zeitlich verkehrt ablaufen.

Der Fluss der Zeit verliert durch Newton seine ausgezeichnete Richtung: Vorwärts, rückwärts, der Mechanik ist das einerlei. Das passt auf ideale Wurfparabeln und Planetenbahnen, auf elastische Stöße und mathematische Pendel. Aber reale Pendeluhren benehmen sich eher mittelalterlich: Wenn man sie nicht aufzieht, erlahmt ihr Impetus, sie bleiben stehen. Zeitumkehr-Invarianz ist in der Realität die seltene Ausnahme. Aus den meisten Alltagsvorgängen wird, wenn man sie als verkehrten Film abspult, ein Wunder. Nur im Kino zieht sich der Flaschengeist aus Tausendundeiner Nacht, der aus seiner Ampulle entwichen ist und riesig über Sindbad schwebt, spontan zusammen und schlüpft wieder in sein enges Gefängnis zurück. Offensichtlich verhalten sich Gase nicht zeitsymmetrisch. Dass komprimierte Luft spontan ausströmt, sobald sich eine Öffnung bietet, zählt zu den leidvollen Erfahrungen des Radfahrers. Das Umgekehrte – spontanes Sich-von-allein-Auf-pumpen eines Platten – ist mindestens so märchenhaft wie die freiwillige Rückkehr des Geistes in seine Flasche.

Auf solche Probleme ließen die Physiker sich erst ein, nachdem mit der Dampfmaschine die industrielle Revolution in Fahrt gekommen war. Ein geschlossener Wasserkessel wird erhitzt, der Dampfdruck treibt einen Kolben, aus Wärme wird Bewegungsenergie. Und wenn wir die Bremse betätigen, verzettelt sich die Vorwärtsbewegung des Gefährts als diffuse Erwärmung der Bremsbacken.

Entropie und der Pfeil der Zeit

Das sind irreversible Vorgänge. Die Hitze des Dampfs – oder die Reibungswärme von Maschinenteilen – diffundiert auf Nimmerwiedersehen in die Umgebung. Der expandierte Dampf im Kolben kontrahiert sich nicht von selbst wieder auf Kosten der Umgebungswärme; und Bremsbacken kühlen sich niemals spontan ab, um stillstehende Fahrzeuge in Gang zu setzen. Bei allen Energieumwandlungen bleibt zwar die Gesamtenergie stets erhalten – das besagt der Erste Hauptsatz der Wärmelehre –, aber die Energie verliert mit der Zeit ihre Nutzbarkeit. Dies drückt der berühmte Zweite Hauptsatz aus: Die Entropie, ein abstraktes Maß für Nicht-mehr-Nutzbarkeit – oder Nivellierung, Vergeudung – der Energie, nimmt tendenziell zu.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Damit taucht in der Physik, die sich vor dem nur auf reversible Prozesse spezialisierte, zwar endlich eine Richtung der Zeit auf, aber auf einem recht abgehobenen Niveau. In unserem alltäglichen Erleben ist das anders: Die Zeit ist eine so grundlegende Voraussetzung jeder Erfahrung – sind außerzeitliche Erfahrungen überhaupt vorstellbar? –, dass man meinen könnte, schon die fundamentalste Physik müsse eine Zeitrichtung auszeichnen. Doch alle physikalischen Vorgänge werden im Einzelnen nach wie vor durch Gesetze beschrieben, die keine Zeitrichtung kennen; das gilt nicht nur für Newtons Mechanik, sondern auch für Maxwells Gleichungen des Elektromagnetismus – und ebenso für Einsteins Relativitätstheorie und die quantenmechanische Schrödinger-Gleichung. Die Frage bleibt: Wie kann aus lauter reversiblen Einzelprozessen ein irreversibles Verhalten des Gesamtsystems hervorgehen?

Als Antwort formulierte der österreichische Theoretiker Ludwig Boltzmann Ende des 19. Jahrhunderts die Statistische Physik. Sie betrachtet Gase als Ansammlungen zahlreicher Atome, die, könnte man sie einzeln quasi unter dem Mikroskop verfolgen, nach den re- ▷

▲ Seit dem Urknall verläuft die Geschichte des Universums in nur eine Richtung – nach Gesetzen, die keine Zeitrichtung kennen.

▷ versiblen Regeln der Mechanik umherschwirren und miteinander kollidieren. Wenn man aber von den mikroskopischen Einzelschicksalen absieht und das statistische Verhalten des gesamten Teilchenensembles untersucht, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit.

Wie Boltzmann vorrechnete, ist der im Großen und Ganzen ungeordnete, energetisch nivellierte Systemzustand wahrscheinlicher als ein geordneter, differenzierter, und deshalb strebt das Gesamtsystem mit der Zeit zu höherer Entropie. Dies drückt die Boltzmann-Formel $S = k \log W$ aus – die Entropie eines Zustands ist proportional zum Logarithmus seiner Wahrscheinlichkeit –, die den Grabstein des Forschers ziert und vielleicht nicht weniger Berühmtheit verdient als Einsteins Energieformel $E = mc^2$.

Gegen Boltzmanns Theorie erhoben zeitgenössische Physiker sofort den nahe liegenden Einwand, sie widerspreche der Zeitsymmetrie der Grundgleichungen. Man brauche nur alle mikroskopischen Teilchenbewegungen umzukehren, und schon nehme die Entropie des makroskopischen Systems ab, in Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz. Dieser »Loschmidt'sche Umkehrinwand« entspricht genau dem Filmtrick, durch den der Flaschengeist in seine kleine Phiole zurückkriecht. Tatsächlich hindert kein Gesetz der Mechanik einzelne Atome, die Freiheit der großen weiten Welt aufzugeben und sich in einem kleinen Behälter zu versammeln. Nur dass das viele tun, ist desto unwahrscheinlicher, je mehr Atome beteiligt sind – und diese Wahrscheinlichkeit nimmt mit der Zahl der beteiligten Teilchen sogar exponentiell ab. Wie Modellrechnungen des Heidelberger Physikers H. Dieter Zeh mittels Computer zeigen, müsste man schon bei einem zweidimensionalen »Gas« aus 50 Atomen ziemlich lange warten, bis sich alle zufällig in einem Sechstel der verfügbaren Fläche ansammeln, nämlich gut 10^{17} Mal so lange, wie das Universum alt ist.

Damit ist der Entropiesatz zwar statistisch gerettet und mit ihm eine physikalische Basis des Zeitflusses garantiert. Dennoch bleibt bemerkenswert, dass die Richtung der Zeit nicht in den physikalischen Grundgleichungen verankert ist, sondern erst aus Wahrscheinlichkeitsüberlegungen hergeleitet werden muss. Das gilt heute, nach Einstein und der Quantentheorie, genauso wie vor hundert Jahren. »Wenn wir sagen, eine bestimmte Variable sei »die Zeit«, machen wir keine Aussage über die fundamentale mechanische Struktur der Realität, sondern über die statistische Verteilung, mit deren Hilfe wir die makroskopischen Eigenschaften des Systems beschreiben«, betont

Carlo Rovelli noch 2004 in seinem Buch »Quantum Gravity«. Und noch zugespitzter: »Die Existenz der Zeit ist das Resultat unseres Unwissens. Die Zeit ist Ausdruck unserer Unkenntnis des Mikrozustands.«

Heißt das etwa, die Zeit sei eine bloße Illusion, die Natur an sich zeitlos? Diese Idee ist so alt wie das menschliche Denken. Der antike Philosoph Parmenides argumentierte: Das Sein ist, das Nichtsein ist nicht. Gäbe es zeitliche Veränderung, so würde etwas entstehen, das vorher nicht da war – es müsste ein Übergang vom Nichtsein zum Sein stattfinden. Da es kein Nichtsein gibt, kann es weder ein Werden geben noch einen leeren Raum. Das Sein ist ewig, allumfassend, unveränderlich und lückenlos.

Der unwahrscheinliche Beginn des Universums

Die antike Gegenposition formulierte Demokrit: »Es gibt nur Atome und leeren Raum, alles andere ist Meinung.« Heute erscheint uns das als Vorwegnahme des modernen Standpunkts. Doch sogar in der neuzeitlichen Physik blieb der Atomismus lange umstritten. Selbst Boltzmanns Zeitgenosse Ernst Mach hielt die Existenz von Atomen für eine prinzipiell unbeweisbare Denkkannahme; er soll bei jeder Erwähnung von Atomen spöttisch gefragt haben: »Ham's eins g'sehn?« Manche vermuten sogar, Boltzmanns Selbstmord hänge mit dem erbitterten Widerstand – unter anderem von Henri Poincaré und Max Planck – zusammen, auf den seine atomistische Begründung des Zweiten Hauptsatzes zunächst stieß. Ein Einwand lautete: Wenn die Entropie umso wahrscheinlicher ist, je höher sie ist, wieso ist sie dann gegenwärtig so unwahrscheinlich niedrig, dass sie noch weiter steigen kann?

Boltzmann konnte sich seinerzeit nur mit einem schwachen Ad-hoc-Argument verteidigen: Es muss in der Vergangenheit im beobachtbaren Teil des Universums eine riesige Zufallsfluktuation gegeben haben, gleichsam einen spontanen Ausbruch von unwahrscheinlicher Ordnung, von der die Entropiezunahme seither zehrt. Heute wäre Boltzmann mit dem kosmologischen Standardmodell gewappnet. Der Urknall und die nachfolgende Inflationsphase sorgten am Anfang für so niedrige Entropie, dass noch 13,7 Milliarden Jahre später unser heutiges Universum genügend Spielraum für weitere Entropiezunahmen bietet.

Wie groß diese Entropiekapazität ist, hat der Theoretiker Roger Penrose für ein homogenes, geschlossenes Modelluniversum aus 10^{88} Materie- und Strahlungsteilchen abgeschätzt. Er kommt auf eine Entropie von 10^{88}

Der altrömische Kirchenlehrer Augustinus (354–430) erkannte erstmals im Wesen der Zeit ein Problem voller Widersprüche.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

für den gegenwärtigen Zustand und den Wert von 10^{123} für einen Endzustand, bei dem dieses Universum zu einem einzigen Schwarzen Loch kollabiert. Um die Wahrscheinlichkeit der beiden Zustände zu vergleichen, müssen diese Zahlen gemäß Boltzmanns Formel noch zur Potenz erhoben werden, wobei der erste, kleinere Wert dann überhaupt nicht mehr ins Gewicht fällt. Das heißt: Der Endzustand ist um eine Eins mit 10^{123} Nullen wahrscheinlicher als der gegenwärtige. Diese Zahl, die den Spielraum für künftige Entropiezunahmen angibt, ist so ungeheuer groß, dass sie sich nicht einmal im Entferntesten hinschreiben lässt, wenn wir an jedes der 10^{88} Teilchen des Universums eine Null heften; es müssten schon 10^{35} Nullen pro Teilchen sein.

Das also ist die Antwort der Physiker auf die Frage nach dem Ursprung der Zeit: Sie kommt von den singulären Anfangsbedingungen des Universums, nicht von den fundamentalen Naturgesetzen. Der Urzustand unserer Welt war so unermesslich geordnet und unwahrscheinlich, dass die Naturgeschichte seither in einem Wechselspiel von lokaler Strukturbildung und insgesamt steigender Unordnung ablaufen kann. Dieser zeitlich unumkehrbare Ablauf wird geregelt durch zeitlich umkehrbare Gesetze.

Vergebliche Suche nach dem Entropie-Operator

Der altgriechische Atomist Epikur hat einst einen Anfang der Welt erdacht, der diesem Bild erstaunlich ähnelt: Ursprünglich sanken die Atome parallel in freiem Fall durch den Weltraum herab – sie bildeten, würden wir heute sagen, einen maximal geordneten Zustand laminarer Strömung. Doch gelegentlich kam es in diesem gleichmäßigen Partikelregen dann doch zu »Deklinationen«, zu winzigen Zufallsabweichungen einzelner Atome vom geraden Fall, und dadurch zur turbulenten Zusammenballung der Atome zu Dingen. Heute müssen die Physiker Quantenfluktuationen bemühen, um das Entstehen von Inhomogenitäten im frühen Universum zu erklären.

Eigentlich ist es kein Wunder, dass die theoretischen Physiker die Zeit möglichst weit aus der Welt hinausdrängen möchten. Die Physik sucht nach unveränderlichen Naturkonstanten und nach immer und überall gültigen Naturgesetzen. Ihr Ideal ist ein Blockuniversum, in dessen vierdimensionaler Raumzeit alle Bewegungen eingefroren sind wie die Einzelbilder auf einem Filmstreifen. Vielleicht deshalb war es auch kein Physiker, sondern der belgische Chemie-Nobelpreisträger Ilya Prigogine, der im letzten Drittel des vorigen Jahrhunderts einen Paradigmenwechsel »vom



Sein zum Werden« propagierte, indem er sich auf seine erfolgreiche Erweiterung der Statistischen Physik berief. Prigogine beschrieb so genannte dissipative Strukturen, das heißt offene Systeme, die in fortwährendem Austausch mit der Umgebung quasi Ordnung aufsaugen – wie wir Menschen das in unserer hochorganisierten Alltagswelt und angesichts der belebten Natur ja als Normalfall erleben. Davon ausgehend skizzierte Prigogine eine Einheitswissenschaft, in der die Zeit eine fundamentale Rolle spielen sollte; diese neue Physik würde das spontane Entstehen von Ordnung nicht mehr als unwahrscheinliche Ausnahme beiseite schieben, sondern sich der einheitlichen Beschreibung unterschiedlichster komplexer Strukturen widmen.

Prigogine wusste freilich, dass sein faszinierender Anspruch sich letztlich an einer Neuformulierung der fundamentalen Physik bewähren musste. Er versuchte darum gegen Ende seines Lebens, die Quantenmechanik als eine Art Ensembletheorie im Geiste Boltzmanns umzuformulieren. Die Zeit, die in der herkömmlichen Quantentheorie das Schattendasein eines bloßen Parameters fristet, sollte als Entropie-Operator den gleichen Rang beanspruchen wie die Observablen Ort, Impuls und Energie.

Dabei hätte sich die Zeit vervielfacht zu den individuellen Eigenzeiten unterschiedlich komplexer Systeme; jedes System hätte gleichsam seine innere Uhr in sich getragen, und jede hätte eine andere Zeit angezeigt. Die große Vereinigung der Naturwissenschaft unter der Hoheit des Entropiebegriffs scheiterte allerdings an der nichtklassischen Eigenart der Quantenphänomene – ein Schicksal, das Prigogines Ansatz mit Einsteins spätem Versuch einer Allgemeinen Feldtheorie teilt.

So bleibt die paradoxe Kluft zwischen zeitlichem Anfang und ewiger Dauer ungeschlossen, und wir empfangen jede Sekunde unseres halbwegs geordneten Lebens als unwahrscheinliches Geschenk des Zufalls. ◁



Michael Springer ist Schriftsteller und ständiger freier Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Entropie. Von H. Dieter Zeh, Fischer 2005

Phänomen Zeit. Spektrum Spezial 1/2003

The physical basis of the direction of time. Von H. Dieter Zeh. Springer, Heidelberg 2001

Vom Sein zum Werden. Von Ilya Prigogine. Piper, München 1979

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.