

# Warum die Zeit nicht rückwärts läuft

Über Zeit in der Physik, die Entropie  
und ein schmutziges Fahrrad

*von Roger Erb*

Viele grundlegende physikalische Gesetze sind auch gültig, wenn die Zeit rückwärts läuft. Weil aber Unordnung viel wahrscheinlicher ist als Ordnung, sind die meisten realen Prozesse nicht umkehrbar.

**D**as Jahr 2017 begann für uns alle mit einem Tag, der um eine Sekunde verlängert war – diese zusätzliche Schaltsekunde war nötig, um die Weltzeit, die durch genau gehende Uhren repräsentiert wird, wieder in Takt zu bringen mit der Erdrotation und damit dem Wechsel von Tag und Nacht. Die Erde nämlich rotiert zum einen nicht völlig gleichmäßig, weil Massenverschiebungen auf die Drehgeschwindigkeit Einfluss haben, und zum anderen nimmt die Tageslänge kontinuierlich zu, da die Gezeitenreibung die Rotation bremst.

Während der natürliche Tagesrhythmus ausschlaggebend für unser Zeiterleben ist, sind Menschen zugleich bestrebt, immer genauer gehende Uhren zu bauen. In einer Pendeluhr nutzt man die Erkenntnis aus, dass die Schwingungsperiode eines Pendels von dessen Länge, aber nicht von der Schwingungsweite abhängt, und realisierte so die Zeiteinteilung in Sekunden in einem eigens hierfür gebauten Apparat. Als Einheit war die Sekunde auf den periodischen Wechsel von Tag und Nacht bezogen und wurde zunächst definiert als der 86400ste Teil eines mittleren Sonnentages.

Im Jahr 1967 wurde international vereinbart, die Dauer einer Sekunde nicht mehr durch die Tageslänge festzulegen, sondern über die

Schwingung eines Mikrowellensignals, welches in einer Atomuhr entsteht. Seit 1978 kommt das für das öffentliche Leben maßgebliche Zeitsignal von einer solchen Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) und wird in der Nähe von Frankfurt für den Empfang mit Funkuhren ausgesandt. Wie aber kann man sich sicher sein, welcher periodische Vorgang das »richtige« Verstreichen der Zeit anzeigt?

#### **Uhren messen Zeit und definieren sie zugleich**

»Selbst, wenn das Stundenglas zerspringt, wenn in der Dunkelheit kein Licht mehr auf die Sonnenuhr fällt, wenn die Hauptfeder so weit abgelaufen ist, dass die Uhrzeiger stillstehen wie der Tod – die Zeit selbst geht weiter. Bestenfalls zeigt die Uhr dieses Fortschreiten an. Und da die Zeit nur ihre eigene Geschwindigkeit kennt, so wie der Herzschlag oder der Rhythmus der Gezeiten, enthalten Uhren die Zeit nicht. Sie halten nur Schritt mit ihr – wenn sie können.« [1]

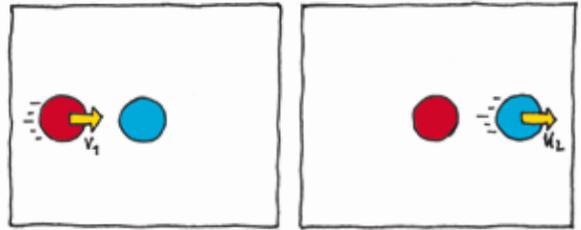
Die Zeit nimmt ihren Gang, unabhängig davon, ob jemand sie misst oder nicht. Das ist zunächst nichts Außergewöhnliches, denn auch beispielsweise der Raum war schon vorhanden, bevor die Längeneinheiten erfunden wurden. Dennoch ist unser Erleben dieser beiden Begeben-

heiten unterschiedlich, denn während der Raum einfach gegenwärtig ist und keine ausgezeichnete Richtung besitzt, entwickelt sich die Zeit in immer nur eine Richtung voran.

Das Registrieren des unabänderlichen Vorschreitens der Zeit durch eine Uhr ist für uns alltäglich. Dabei besteht aber ein Problem: Wir benutzen die zeitliche Gleichförmigkeit periodischer Prozesse, um die Zeiteinheit zu definieren – und können uns über die vorausgesetzte Gleichförmigkeit nur infolge von Zeitmessungen sicher sein.

Diese Verknüpfung, aber auch das Wesen der Zeit an sich, hat schon zu vielfältigen vertieften Betrachtungen Anlass gegeben. Besonders bekannt geworden ist die von Stephen Hawking diskutierte Verbindung zwischen dem Urknall und dem Beginn der Zeit. Albert Einstein hat deutlich gemacht, dass in zwei zueinander bewegten Bezugssystemen die Zeit nicht gleich abläuft. Carl Friedrich von Weizsäcker war eine Begründung des Phänomens selbst wichtig: »Die fundamentale Struktur der Zeit ist ihr objektives Fortschreiten.« [2]

Die Physik geht mit der Problematik, dass Uhren Grundlage der Definition der Zeiteinheit sind und zugleich als Messgeräte eingesetzt werden, pragmatisch um: Eine Vielzahl periodischer



1

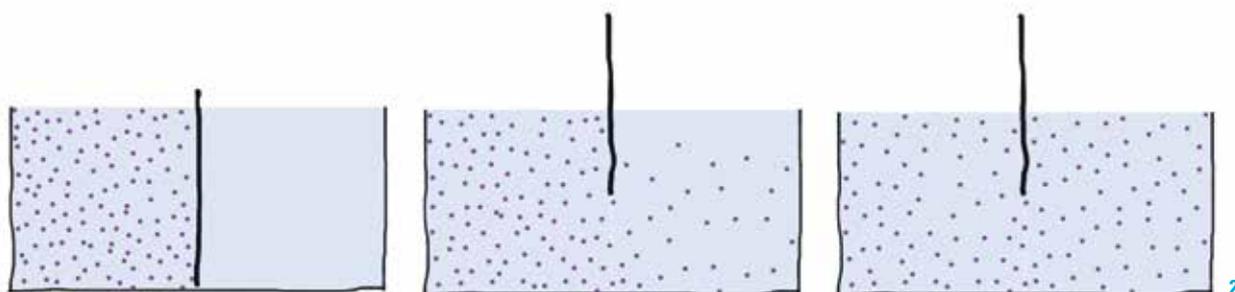
Vorgänge dient der gegenseitigen Referenz, und wie immer in der Physik ist ein in sich schlüssiges System der Begriffe, Definitionen und experimentellen Befunde das erklärte Ziel.

### Zeit kann man vor-, aber nicht zurückdrehen

Galileo Galilei gilt als Begründer der experimentellen Methode [3], bekannt geworden sind unter anderem seine Falleexperimente. Nach seinen Überlegungen ist die Fallbewegung nicht abhängig von der Masse, solange Reibungseinflüsse vermieden werden. Er konnte zeigen, dass die Geschwindigkeit einer fallenden Kugel proportional mit der Zeit zunimmt. Weiß man Ort und Geschwindigkeit einer Kugel zu einem bestimmten Zeitpunkt, so kann man die entsprechenden Größen für spätere Zeitpunkte vorausberechnen. Auch in vielen weiteren Fällen wird in der Physik das Verhalten eines Systems in der Zeit berechnet; für Physikerinnen und Physiker ist die Zeit also besonders wichtig, sie sehen gewissermaßen in die Zukunft, allerdings nur unter abgestimmten Bedingungen und mit der Möglichkeit einer experimentellen Überprüfung!

Beim Messen von Veränderungen in der Zeit versucht man auch, den »Moment« zu erfassen. Es ist vergleichsweise einfach, etwas über die (Durchschnitts-)Geschwindigkeit eines Wagens während einer bestimmten Fahrtzeit auszusagen. Aber wie schnell ist ein Wagen in einem bestimmten Moment, wenn er beschleunigt, sich seine Geschwindigkeit also ständig ändert? Hierfür wurde der Begriff der *Momentangeschwindigkeit* eingeführt, was unter anderem auch wesentlich zur Entwicklung der modernen Mathematik beigetragen hat. Der infinitesimal kleine Moment trennt Vergangenheit und Zukunft. Das Gehirn dagegen verarbeitet als Gegenwart Zeiteinheiten von etwa drei Sekunden, wie Psychologen und Hirnforscher herausgefunden haben. Die kleinste unterscheidbare Zeitdifferenz beträgt dabei 30 Millisekunden. [4]

Auf diese Weise erfahren wir den Verlauf der Zeit als unabänderlich in eine bestimmte Richtung. Gilt dies aber auch unabhängig von unserer Wahrnehmung?



2

Die Zukunft erleben wir als veränderbar, die Vergangenheit dagegen nicht. Beide werden getrennt durch die Gegenwart. Diese Unabänderlichkeit der Vergangenheit reizt die Fantasie: Besonders populäre Schilderungen von Zeitreisen in die Vergangenheit finden sich zum Beispiel bei H. G. Wells oder (in jüngerer Zeit) bei

J. K. Rowling. Abgesehen davon, dass man auf die Realisierung solcher Reisen nach festem Wissen der Physik nicht zu hoffen braucht, kann man sich überlegen, ob sie überhaupt wünschenswert wären: Die Auswirkungen einer veränderbaren Vergangenheit auf die Gegenwart lassen sich wohl nur ertragen, wenn – wie in einer populären Filmkomödie – nach einer überraschenden Entwicklung aufgrund einer Variation im Ablauf der nächste Tag immer wieder als derselbe morgens früh um 6 Uhr beginnen darf.

**1** Die von links kommende rote Kugel stößt die ruhende blaue Kugel. Nach dem Stoß ist die rote Kugel in Ruhe und die blaue bewegt sich. Der Vorgang kann auch in zeitlich umgekehrter Richtung ablaufen, wobei sich die Richtungen der Geschwindigkeiten umkehren: Dann rollt die blaue Kugel von rechts in das Bild und stößt auf die rote.

**2** Ein Gefäß mit einer herausziehbaren Trennwand ist in der rechten Hälfte mit Wasser und links mit Wasser und Farbstoff gefüllt. Beim Herausziehen der Trennwand vermischen sich beide Flüssigkeitsteile selbstständig.

## ENTROPIE

Wenn sich ein einzelnes Teilchen entweder in der einen oder der anderen Hälfte eines Kastens mit dem Volumen  $V$  aufhalten kann und keine davon bevorzugt ist, so ist die Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass das Teilchen in der linken Hälfte ist

$$p = \frac{\text{ausgewähltes Volumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{1}{2}.$$

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwei Teilchen sich zugleich im linken Volumen aufhalten, ist dagegen

$$p = p_1 p_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}.$$

Für  $n$  Teilchen ist die Wahrscheinlichkeit

$$p = \left(\frac{1}{2}\right)^n.$$

Man erkennt hierbei, dass ein geordneter Zustand mit zunehmender Teilchenzahl  $n$  immer unwahrscheinlicher wird. Dies wird mit der Entropie  $S$  oder genauer mit Zunahme der Entropie  $\Delta S$  beschrieben. Diese ist

$$\Delta S = k \ln \frac{p_{\text{nachher}}}{p_{\text{vorher}}}.$$

Dabei ist  $k$  eine Konstante aus der Thermodynamik. Der natürliche Logarithmus  $\ln$  wird gebildet, um die Größe besser handhabbar zu machen.  $\Delta S$  ist damit ein Maß dafür, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Zustand in einen anderen übergeht.

### Warum die Unordnung den Zeitpfeil bestimmt

Dabei erlauben viele grundlegende Gesetze der Physik tatsächlich eine Umkehr der Zeitrichtung. Filmt man etwa den Stoß zweier Billardkugeln, so kann man den Film rückwärts abspielen, ohne dass dies Zuschauerinnen und Zuschauern auffällt. (Abb. 1) Dagegen laufen viele natürliche Vorgänge in nur einer bestimmten Richtung ab. Ein Film vom Abbrennen einer Kerze, in umgekehrter zeitlicher Richtung vorgeführt, würde niemanden überlisten, und auch nicht der umgekehrte Ablauf vom Abkühlen einer Tasse Kaffee in der Küche. Solche Prozesse sind irreversibel. Auch der Anstoß beim Poolbillard auf die fünfzehn im Dreieck angeordneten Kugeln ist in umgekehrter Zeitrichtung unglaublich. Wovon unterscheidet er sich vom Stoß von nur einer Kugel mit genau einer anderen?

Was in den natürlich ablaufenden, irreversiblen Prozessen geschieht, wird mit einer besonderen Größe, der Entropie, beschrieben. Hierfür gibt es zwei verschiedene Zugänge. Zum einen kann man die einzelnen Bestandteile eines Systems betrachten. Dann ist die Entropie ein Maß für die Zahl der Realisierungsmöglichkeiten eines bestimmten Zustandes. Als Beispiel soll hier ein Gefäß dienen, das durch eine herausnehmbare Wand unterteilt ist. Auf beiden Seiten der Trennwand befindet sich Wasser, aber nur auf einer der beiden Seiten ist das Wasser mit Farbe verrührt. (Abb. 2) Wird die Trennwand herausgezogen, so mischen sich die beiden Wassermengen, und die Farbe befindet sich

**Literatur**

- 1 Sobel, D., 1998, Längengrad, Berlin: btb.
- 2 Weizsäcker, C. F. v., 1992, Zeit und Wissen, München, Wien, Carl Hanser, S. 282.
- 3 Kuhn, W., 2001, Ideengeschichte der Physik, Berlin, Heidelberg, Springer.
- 4 Saße, D., 2005, Wie lang ist das Jetzt?, in: maßstäbe, Heft 6, PTB Braunschweig.
- 5 Erb, R., 2014, Warum fährt ein Fahrrad stabil?, in: PdN-Physik 63 (5). S. 42 f.

nach einiger Zeit in gleichem Ausmaß in beiden Hälften. Für jedes Farbstoffteilchen ist dann die Wahrscheinlichkeit, in der linken oder rechten Hälfte zu sein, gleich groß. Es wird sich jedoch (praktisch) nie mehr der Zustand einstellen, dass alle Farbstoffteilchen in nur einer Hälfte versammelt sind. Der Grund ist, dass es sehr viele Realisierungsmöglichkeiten dafür gibt, dass links und rechts gleich viele Farbstoffteilchen sind, aber nur genau eine, bei der alle Teilchen wie zu Beginn auf der linken Seite sind (vgl. »Entropie«, Seite 13).

Wenn ein System von einem Zustand mit wenigen Realisierungsmöglichkeiten und damit geringer Wahrscheinlichkeit in einen mit vielen Möglichkeiten und damit größerer Wahrscheinlichkeit übergeht, dann wächst die Entropie. Bei den allermeisten natürlich ablaufenden Prozessen wächst die Entropie. Sie sind irreversibel. Vereinfacht sagt man daher auch, dass in einem (geschlossenen) System die Unordnung niemals abnehmen kann und meistens zunimmt (alle Farbstoffteilchen auf einer Seite: geordnet; Farbstoffteilchen auf beide Seiten verteilt: ungeordnet. Versuchen Sie, diesen Gedanken auch auf den Startstoß beim Billard anzuwenden!). Das Anwachsen der Entropie zeigt also, in welche Richtung sich ein System entwickeln kann, und damit, in welcher Richtung die Zeit fortschreitet. Meine persönliche Lieblingsformulierung zur Veranschaulichung der Entropiezunahme ist übrigens: Ein Fahrrad wird von selbst schmutzig, aber niemals sauber.



**Der Autor**

**Prof. Dr. Roger Erb**, Jahrgang 1961, ist seit 2010 Professor für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität. Bis 2015 war er Sprecher des Fachverbands Didaktik der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, derzeit ist er Studiendekan der Physik und Mitglied des Direktoriums der Akademie für Bildungsforschung und Lehrerbildung. Seine Arbeitsschwerpunkte sind das Experimentieren im Physikunterricht und Themenbereiche aus der Optik. Sein Fahrrad nutzt er nicht nur zum Beobachten der Entropiezunahme, sondern auch zum Fahren. [5]

[roger.erb@physik.uni-frankfurt.de](mailto:roger.erb@physik.uni-frankfurt.de)

Für den zweiten Zugang zur Entropie betrachtet man ein System als Ganzes. So wird das Anwachsen der Entropie beispielsweise deutlich, wenn man zwei Behälter mit Wasser unterschiedlicher Temperatur miteinander in Kontakt bringt. Dann nämlich fließt Wärme vom heißen zum kälteren Reservoir, und beide sind danach lauwarm. Niemals dagegen erwärmt sich dasjenige mit der höheren Temperatur auf Kosten des kälteren Reservoirs. Auch dabei wird also die Richtung des Zeitpfeils erkennbar.

Man könnte versucht sein, eine Maschine zu bauen, die die Weltmeere als nahezu unerschöpfliche Wärme- und damit Energiequelle nutzt. Dazu müsste ein Teil dieser Wärme (beziehungsweise thermischer Energie) aus dem Wasser selbstständig in ein anderes Reservoir fließen. Da dieses aber eine höhere Temperatur hätte, ist eine solche Maschine nicht zu realisieren (Perpetuum mobile 2. Art). Allerdings nicht, weil dabei die Erhaltung der Energie verletzt würde, sondern weil die Entropie sinken würde.

Es lassen sich noch weitere, grundsätzlich andere Prozesse finden, die eine Richtung der Zeit vorgeben. Meistens aber wird hierfür – wie in diesem Beitrag – das Anwachsen der Entropie diskutiert, auch weil die Vorgänge, an denen sich dies zeigt, im Alltag allgegenwärtig sind.

**Entropie und Energieentwertung**

Obwohl wir in der Physik davon überzeugt sind, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, spricht man im Alltag oft von *Energieverbrauch*. Damit ist aus physikalischer Sicht gemeint, dass zwar die Menge der Energie sich nicht ändert, aber ihre Nutzbarkeit. So wird Energie vom Elektrizitätswerk geliefert (und von uns bezahlt) und dann im Wasserkocher in Wärme (oder eigentlich: thermische Energie) des Wassers umgewandelt. Die Energie des erwärmten Wassers lässt sich aber praktisch kaum noch wieder in eine andere Form umwandeln. Diese Entwertung erscheint uns als Verbrauch, sie ist aber eine Erhöhung der Entropie.

Auch mit solchen Diskrepanzen zwischen Alltags- und Fachverständnis hängt es zusammen, dass Physik als schwer verständlich (und oft als unbeliebt!) gilt. Es ist die Aufgabe von Physiklehrkräften und Physikdidaktikerinnen und -didaktikern, dafür zu sorgen, dass sich hierbei kein Zeitpfeil hin zu einem schlechteren Verständnis einstellt. Ein Vorschlag für den Physikunterricht ist, der Entropie einen ebenso großen Stellenwert einzuräumen wie der Energie. Dann könnte man eine Aufklärung über Energieverbrauch und Energieentwertung erreichen und damit auch zugleich die Frage nach der Richtung der Zeit beantworten. ●