

# Zur Physik des Zeitpfeils

Günter Mahler

Plenarvortrag am 7. April 2014 im Rahmen der  
64. Lindauer Psychotherapiewochen 2014 ([www.Lptw.de](http://www.Lptw.de))

**Kontakt:** Prof. Dr. Günter Mahler  
Institut für Theoretische Physik  
Universität Stuttgart  
70550 Stuttgart

[mahler@itp1.uni-stuttgart.de](mailto:mahler@itp1.uni-stuttgart.de)

## Einleitung

“Just as it was difficult to separate space conceptually from its concrete content, it required a considerable effort of abstraction to differentiate time from changes and events “taking place” in it. The mythological image of time as a person which drags all things into a ceaseless flux was the first crude step in this direction.”  
(M. Čapek, *Time*, in: Dictionary of the History of Ideas, Internet Version University of Virginia)

Ironischerweise geht die moderne Physik hier wieder in die umgekehrte Richtung: Weg von der absoluten Zeit eines Galilei oder Newton hin zur relationalen Zeit eines Einstein: Zeit ist gerade nicht unabhängig von den Inhalten der Raum-Zeit: “Zeit ist, was Uhren messen.” Und auch der Pfeil der Zeit ist nicht absolut, sondern explizit bezogen auf sogenannte nicht-umkehrbare (gerichtete) Prozesse, d.h. Sequenzen von Ereignissen.

Wenn es um konkrete Zeitdauern (gemessen in wohl-definierten Einheiten) geht, sprechen wir von der Metrik der Zeit; geht es nur um die Reihenfolge (das Nacheinander) von Ereignissen, sprechen wir von der Topologie der Zeit. Vornehm formuliert wird es im Folgenden also um Metrik und Topologie der Zeit gehen. Das ist nicht so trocken, wie es klingt: Im Hintergrund toben Kämpfe um die Deutungshoheit. Denn der im obigen Zitat angesprochene Konflikt schwelt weiter.

Solche verschiedenen Standpunkte lassen sich aber gelassener betrachten, wenn man sich den Charakter der Physik als Naturwissenschaft klar macht. Die Aussagen der Physik sind beschreibend und kontextuell; die benutzten Konzepte sind Konstrukte unseres Denkens. Die Sprache der Wahl ist Mathematik. Zu fordern ist Konsistenz, d.h. Widerspruchsfreiheit<sup>1</sup>; es geht aber nicht darum, ob Zeit, Raum, Entropie etc. “wirklich” existieren. Es geht nicht um Ontologie. Damit wird ein gewisser Pluralismus unterschiedlicher Modellvorstellungen bzw. Interpretationen (sofern diese jeweils in sich konsistent sind) zumindest erträglicher.

### 1. Alles unter Kontrolle?

---

<sup>1</sup>Inkonsistenz ist nicht akzeptabel; diese müsste als Hinweis auf eine fehlerhafte Beschreibung gewertet werden.

Physik ist eine Erfahrungswissenschaft; wesentlich sind Beobachtungen bzw. Messungen als Grundlage von Fragestellungen wie auch als Test vorhandener Theorie-Gebäude. Konstitutiv ist also ein Beobachter/Agent – ohne Ansehung persönlicher Eigenschaften, statt dessen ausgestattet mit technischem Instrumentarium seiner Wahl.

Direkt messbar sind nur dimensionslose Größen: Messen heißt Zählen. So wird die Länge eines Vorhangsstoffs ermittelt durch Abtragung einer Grundeinheit, z.B. eines Holzstocks von 50 Zentimeter Länge: 3,5 Meter ergibt sich durch 7-maliges Abtragen dieses Stocks.

Die Maßeinheiten selbst müssen durch konkrete Vorschriften (internationale Vereinbarungen) realisiert werden. So wird z.B. die Massen-Einheit durch einen Prototyp in Paris dargestellt, die Längeneinheit nicht mehr, wie früher, als Teil des Erdumfangs, sondern als den Abstand, der von Licht in  $1/c$  Sekunden zurückgelegt wird ( $c =$  Lichtgeschwindigkeit); die Zeiteinheit schließlich wird repräsentiert durch ein Vielfaches der Periodendauer einer Cäsium-Schwingung (Atomuhr). Die mittlerweile (2013) erreichte Präzision ist fast unvorstellbar: Wäre eine solche Atomuhr zum Zeitpunkt der Entstehung unseres Universums (also vor etwa 13,7 Mrd. Jahren) gestartet worden, müsste man heute mit einer Ungenauigkeit von lediglich 0,1 Sekunden rechnen! Angesichts dieser Leistung scheint jede Klage über die Unklarheit der Zeit obsolet.

## 2. Der Uhren-Prozess

Jede Uhr ist eine Maschine, welche zur Erfüllung ihrer Funktion speziell hergestellt wurde (Artefakt). Gewünscht ist eine möglichst stabile periodische Bewegung (einfaches mechanisches Beispiel: Pendel oder Metronom). Die periodische Wiederkehr allein ergibt aber noch keinen Zeitmesser: Notwendig ist zusätzlich die Taktzählung; schon als mathematische Operation ist aber das Zählen ein gerichteter Prozess. Physikalisch gesehen handelt es sich um Messungen (und Speicherung der Messdaten). Dies sind auch im Sinne der Physik notwendig “irreversible” (unumkehrbare) Prozesse. Die Gerichtetheit ist “funktional”, d.h. untrennbar mit der gewünschten Funktion (Zeitmessung) verbunden<sup>2</sup>.

Was ist eine “gute” Uhr? Henri Poincaré formuliert dazu in “La Mesure des Temps” (1904):

“Die Zeit muss so definiert werden, dass die Gleichungen der Me-

---

<sup>2</sup>Analogien hierzu sind spezielle mathematische Funktionen: z.B. ist die Addition  $x + y = z$  nicht eindeutig umkehrbar; wenn man solche Operationen braucht, muss man deren logische Irreversibilität in Kauf nehmen.

chanik so einfach wie möglich werden. Mit anderen Worten, es gibt keine Art, die Zeit zu messen, die richtiger ist als eine andere; die, die allgemein angewandt wird, ist nur bequemer.”

Zu den in diesem Sinn nicht-optimierten Zeitmessern gehören etwa der radioaktive Zerfall<sup>3</sup>, die Erd-Drehung (Messung der Tageslänge), Alterungsprozesse (technisch oder auch biologisch), oder so exotische Möglichkeiten wie Gletscher-Rückzugsmarken, etc. Es dürfte klar sein, dass z.B. die Bewegung der Erde um die Sonne beschrieben in Zeiteinheiten proportional zum räumlichen Rückzug des Morteratsch-Gletschers zwar möglich wäre, aber zu seltsamen und unerklärlichen Schwankungen führen würde. Das wäre nun weit mehr als nur “unbequem”.

### 3. Was ist das Problem?

Warum bleibt die “Natur” der Zeit – trotz der präzisen Zeitmessung (Metrik) – umstritten?

Ein erstes Spannungsfeld ergibt sich aus der Verwendung der Zeit “als gemeinsame Währung”<sup>4</sup> für ganz unterschiedliche dynamische Vorgänge. Die Problematik wird offensichtlich, wenn man sich die diversen Bewegungsgesetze der Physik konkret anschaut: Sie alle enthalten einen Zeitparameter  $t$ . Hat aber dieser Parameter immer die gleiche Bedeutung? Könnte es nicht sein, dass es z.B. eine optische Zeit, eine mechanische Zeit, eine kosmologische Zeit etc. gäbe?

Eine völlige Regellosigkeit zwischen solchen Zeitskalen wäre jedoch sehr seltsam und würde unsere Fähigkeit zum allgemeinen Weltverständnis sehr einschränken. Andererseits würde bereits jeder feste, umkehrbar eindeutige Zusammenhang zwischen den Zeiten es erlauben, wieder von einer “Standard-Zeit” zu reden.

In der Tat scheint eine einheitliche gemeinsame Zeit eine kontingente Eigenschaft des Naturgeschehens zu sein; ihre optimierte Darstellung im Sinne Poincarés gilt nicht nur für die Mechanik.

Ein zweites Spannungsfeld wird durch das Gegensatzpaar Zeitlichkeit/Ewigkeit umrissen. Als zeitlos wird die Logik und die Mathematik begriffen; deren Aussagen tragen keine Zeitmarken. Zeitlosigkeit wird auch mit dem Ideal der “Vollständigkeit” assoziiert. Dies gilt nicht nur z.B. für die Hindu-Philosophie,

---

<sup>3</sup>Vgl. Carbon-Datierungsmethode zur Altersbestimmung biologischer Materie nach dem Ende der Lebensprozesse.

<sup>4</sup>Man beachte, dass Geld als gemeinsame Währung den Tauschhandel enorm vereinfacht. Entsprechend würde man vereinfachte Beziehungen zwischen Zustands-Veränderungen durch die Zeit als gemeinsames Takt-Maß erwarten.

sondern auch für die Physik: Unterstellt man deterministische Bewegungsgleichungen, so würde eine vollständige Beschreibung des Jetzt-Zustandes Zukunft wie Vergangenheit festlegen. Zeitlosigkeit bedeutet hier allerdings nicht, dass es keine Zeit gäbe, sondern nur, dass die Entwicklung mit der Zeit nichts bringt: “Es gibt nichts Neues unter der Sonne.”

Mit ähnlichen Konsequenzen wartet die sogenannte “zyklische Zeit” auf. Sie bedeutet ewige Wiederkehr; ansatzweise wird dies in religiösen Ritualen (Jahreszyklus) inszeniert. In der Physik ergibt sich für abgeschlossene Systeme (mit potentiell vollständiger Beschreibung) die mathematische Konsequenz der Poincaré Wiederkehr. Jeder Ausgangs-Zustand muss – oft allerdings erst nach außerordentlich langer Zeit (z.B. Milliarden von Jahren) – nahezu identisch wieder erreicht werden. Die zyklische Zeit hat eine pessimistische Konnotation: Die Welt hat keinen Zweck, kein Ziel.

Ein drittes Spannungsfeld bezieht sich auf die Natur des Zeitpfeils. Die fundamentalen Grundgleichungen der Physik sind Zeitumkehr-invariant, d.h. zu jeder Lösung in der einen Richtung gibt es auch die in der umgekehrten Richtung. Also kein “Pfeil” – für abgeschlossene Systeme mit vollständiger Beschreibung.

Allerdings: Nur das Universum als Ganzes (uns als Beobachter inbegriffen!) ist abgeschlossen. Zugänglich sind uns aber höchstens gewisse Ausschnitte, Teilaspekte. Teile eines Gesamtsystems sind aber notwendigerweise offen, d.h. im Energie- und Teilchen-Austausch mit ihrer jeweiligen Rest-Umgebung. Realistische Modelle der Physik betreffen genau solche offenen Systeme. Die zugehörigen Bewegungsgleichungen sind nicht mehr fundamental, sie müssen die inhärente Unvollständigkeit der Beschreibung berücksichtigen. Eine bemerkenswerte Konsequenz: Die Zeitumkehr-Invarianz geht verloren, typische Bewegungsabläufe offener Systeme tragen einen Zeitpfeil.

Ein viertes Spannungsfeld umfasst die Interpretationen der Zeit und ihre allgemeinen Charakteristika.

## **4. Interpretationen der Raum-Zeit**

Für das Folgende ist eine Betrachtung der Zeit zusammen mit dem Raum angezeigt. Denn eine wesentliche Fragestellung bezieht sich darauf, in wieweit die Zeitkoordinate sich von den Ortskoordinaten wesentlich unterscheidet. Und in wieweit Ort- und Zeit-Koordinaten zusammenhängen.

Wie schon eingangs erwähnt, gibt es zunächst den Widerstreit zwischen der absoluten Auffassung der Raum-Zeit als Gefäß (Galilei, Newton) und der relationalen Auffassung (Aristoteles, Leibniz, Mach), nach der die Raum-Zeit durch Beziehungen der Körper (der Materie) untereinander entsteht. Im Falle der Zeit also über “Veränderungen”. Ohne Veränderung keine Zeit.

Tatsächlich lässt sich ohne Veränderung der Einfluss der Zeit nicht dingfest machen; dies ist offensichtlich ein operationaler Zugang. Laut Gefäß-Vorstellung dagegen bewegt sich die Zeit, unabhängig eventueller physikalischer Veränderungen, sozusagen im Hintergrund als intrinsisch irreversibler Strom.

Die Sonderrolle der Zeit (gegenüber dem Raum) wird betont in der Metapher von der Zeit als “Geschichtenerzählerin”. Die zeitliche Reihenfolge zeigt oft starke Korrelationen (Kausalitätsbeziehungen), die es uns beispielsweise erlauben, durcheinander gekommene Filmbilder wieder in die richtige Reihenfolge zu bringen. Das gilt nicht so ohne weiteres für die räumliche Position unterschiedlicher Gegenstände. Räumlich gibt es keinen Pfeil, Verschiebungen sind in allen Richtungen erlaubt.

Die Sonderrolle der Zeit wird eher unterdrückt im Reden von der sogenannten “vierten Dimension”. Das konsequente vierdimensionale Bild von Raum-Zeit ist hier das Block-Universum nach Minkowski und Einstein. Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft wird nicht unterschieden, jeder Zeitpunkt ist gleich “real” (Eternalismus) und im Rahmen einer deterministischen Dynamik Teil der sogenannten “Weltlinie”. Gegenwart wird zur Illusion, die es allerdings zu erklären bedarf. Welche sprachlichen Verrenkungen hierfür notwendig werden, soll das folgende Zitat verdeutlichen:

“Diese objektive Welt geschieht nicht, sondern sie ist – schlechthin; ein vierdimensionales Kontinuum, aber weder Raum noch Zeit. Nur vor dem Blick des in den Weltlinien emporkriechenden Bewusstseins “lebt” ein Ausschnitt dieser Welt “auf” und zieht an ihm vorüber als räumliches, in zeitlicher Wandlung begriffenes Bild.” (R. Vaas, *Gestern und Morgen sind eins*, Bild der Wissenschaft, 18. Feb. 2008)

Überflüssig zu sagen, dass diese Lyrik nichts erklärt. Es ist unklar, wie in einer fundamental zeitlosen Welt das Phänomen der “prozesshaften Veränderung” entstehen soll<sup>5</sup>. Bisherige Modell-Versuche glauben dafür die Korrelationen zwischen wechselwirkenden Teilsystemen ausnützen zu können.

Schließlich wird von Kant die Zeit als a priori jeder Erfahrung angesehen, und damit als aus der Erfahrung nicht herleitbar.

## 5. Einsteins Universum

---

<sup>5</sup>Umgekehrt lässt sich durch Vergrößerung der Beschreibung ein dynamisches System sehr wohl zu einem stationären machen. Ein langsam und ruhig fließender Bach ist ein Beispiel: Man sieht keine Bewegung, es sei denn, ein Blatt oder ein Ast schwimmt mit.

Zur Quantifizierung jeglicher Größen benötigt man geeignete Koordinatensysteme (Bezugssysteme). Im Falle von Ort und Zeit sind diese Bezugssysteme jedoch nicht abstrakt, sondern enthalten konkrete Anweisungen für den Beobachter; das dafür notwendige Handwerkszeug ist materiell. So werden räumliche Abstände zwischen Objekten messbar durch Abtragen materieller Maßstäbe. Und “Zeit ist, was Uhren messen.” Das Phänomen Zeit ist also an einen materiellen Prozess gebunden, eben den Uhren-Prozess. Dieser operationale Ausgangspunkt von Einstein verdeutlicht, warum Raumzeit und Materie nicht unabhängig sein können.

Einsteins Universum basiert auf zwei Teil-Theorien: Der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. (Der Name Relativitätstheorie ist etwas unglücklich, eigentlich handelt es sich um Transformationstheorien zwischen Bezugssystemen.)

Gemäß der speziellen Relativitätstheorie (SRT) ist die Lichtgeschwindigkeit  $c$  die maximale Signalgeschwindigkeit. Information über entfernte Objekte ist daher rückdatiert. So ist das Licht von der Sonne (und damit unsere Information über die Sonne) 8 Minuten alt, das Licht aus dem Zentrum unserer Milchstraße hat 25 000 Jahre zu uns gebraucht. Umgekehrt würde ein Beobachter im Zentrum der Milchstraße unsere Erde zur hiesigen Steinzeit wahrnehmen. Insofern blicken wir, auf Grund der Laufzeiteffekte, in unterschiedliche Vergangenheiten. Doch unabhängig von den gewaltigen Entfernungen können wir hier noch sagen, was Gleichzeitigkeit bedeutet.

Schließlich berücksichtigt die SRT auch den experimentellen Befund, dass die Lichtgeschwindigkeit nicht nur innerhalb eines Bezugssystems, sondern sogar bezogen auf zu einander bewegten Bezugssystemen immer gleich ist. Das ist eine dramatische Aussage, widerspricht sie doch vollkommen unserer Alltagserfahrung. Wenn ich in einem mit 100 km/h fahrenden Zug mit 3 km/h in Richtung Zugspitze laufe, bin ich für einen äußeren, ruhenden Beobachter mit 103 km/h unterwegs. Meine Geschwindigkeit ist also vom Bezugssystem abhängig, nicht aber die des Lichts. Damit dies konsistent möglich ist, müssen nun räumlicher und zeitlicher Abstand von Ereignissen vom Beobachter abhängig werden.

## 6. Es gibt keine Master-Uhr

Bezüglich eines gegebenen Bezugssystems sind die Taktraten von Uhren-Prozessen wohl definiert. Zu beachten ist, dass das Bezugssystem/Beobachter materiell ist, es erhält seine spezielle Funktion dadurch, dass Ereignisse anderer physikalischer Systeme darauf bezogen werden, dass es also als Referenz benutzt wird. Die Entscheidung, dieses oder jenes System als Referenz auszuwählen, ist willkürlich, aber erlaubt im Rahmen der speziellen Relati-

vitätstheorie, solange die relativen Geschwindigkeiten  $v$  konstant sind (Inertialsysteme).

Gesehen von solchen bewegten Bezugssystemen sind die Taktraten (selbst von optimalen und gleichartigen Uhren) nicht mehr identisch. Jede Uhr geht bezüglich des Systems, in dem sie ruht (Ruhesystem) am langsamsten. Das Konzept der universellen Gleichzeitigkeit (und damit der Synchronisierbarkeit) gilt nicht mehr. Die daraus resultierenden Konsequenzen können dramatisch sein, werden allerdings erst sichtbar, wenn die entsprechenden Relativgeschwindigkeiten in die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit  $c$  kommen. In der Tat gibt es nun eine Zeit-Dilatation – und eine Längenkontraktion. Man beachte aber, dass diese Phänomene lediglich Transformationseigenschaften darstellen für Aussagen zwischen verschiedenen (bewegten) Bezugssystemen. Ein Körper schrumpft nicht in seinem Ruhesystem; er wirkt nur kleiner für einen Beobachter (d.h. ein anderes materielles Objekt), gegenüber dem sich dieser Körper genügend rasch bewegt.

Beispiele für Konsequenzen der Zeit-Dilatation sind: Die Abhängigkeit der Myonen-Lebensdauer<sup>6</sup> von deren Bewegungszustand, der Gangunterschied zwischen einer Atomuhr im Flugzeug (im West- oder Ost-Kurs) gegenüber der auf der Erde, der unterschiedlichen Alterung von Zwillingen, nämlich dem auf der Erde gegenüber dem nach einer längeren Exkursion mit dem Raumschiff<sup>7</sup>.

## 7. Prozessklassen mit Zeitpfeil

Wir haben den Uhren-Prozess als speziellen Prozess mit Zeitpfeil identifiziert (funktionale Irreversibilität). Ein Zeitpfeil impliziert Nicht-Unkehrbarkeit, d.h. aus dem Anfangszustand, dem Ereignis  $E$  folgt  $F$ , aber aus  $F$  folgt nicht  $E$ . Der zweite Prozess-Verlauf wird typischerweise nicht beobachtet, er passiert nicht. Woher aber kommt diese Symmetriebrechung?

Diese Frage ist beunruhigend, da alle mikroskopischen Vorgänge der Physik Zeitumkehr-invariant (reversibel) sind, also wenn man von  $E$  nach  $F$  kommen kann, dann auch von  $F$  nach  $E$ . Wie schon in Abschnitt 3 erwähnt, wird diese fundamentale Reversibilität jedoch in “offenen” Systemen (unvollständige Beschreibung) systematisch verletzt. Unvollständig ist oft auch die

---

<sup>6</sup>Myonen sind Elementarteilchen wie das Elektron; sie entstehen u.a. durch kosmische Strahlung in vielen Tausend Metern Höhe über der Erdoberfläche.

<sup>7</sup>Dieses sogenannte Zwillingenparadoxon resultiert aus der Unsymmetrie zwischen den beiden Zwillingen: Der Raumfahrer ist nach der Exkursion jünger als der zurückgebliebene Bruder auf der Erde. Dies kommt dadurch zustande, dass der Raumfahrer am Umkehrpunkt das Bezugssystem wechseln muss: Erst fliegt er weg (Geschwindigkeit  $v$ ), dann kommt er zurück (Geschwindigkeit  $-v$ ).

Kontrolle/Präparation von Systemen durch den Experimentator. Eine weitere Quelle von Zeitpfeilen sind spezielle Anfangsbedingungen; nicht alles, was im Prinzip möglich wäre, wird auch vorgefunden.

Im folgenden werden wichtige Prozessklassen mit Zeitpfeil behandelt.

## 7.1 Thermodynamischer Zeitpfeil

Basis des sogenannten thermodynamischen Zeitpfeils ist die explizite Berücksichtigung von Unvollständigkeit: Hierzu unterscheidet man zwischen einer Makro- und einer Mikro-Beschreibung. Erstere ist stark vergrößert, verzichtet gegenüber der Mikro-Beschreibung auf Details. Manche verschiedenen Mikrozustände sind daher in der Makro-Beschreibung nicht mehr unterscheidbar, sie sind äquivalent. Es ist zweckmäßig, den Makrozustand durch eine sogenannte Entropie  $S$  zu kennzeichnen;  $S$  ist ein Maß für jene Anzahl äquivalenter Mikrozustände<sup>8</sup>.

Vergrößerte Beschreibungen sind oft unvermeidbar und beabsichtigt: Für eine Meinungsumfrage interessiert z.B. nur die Einstellung zu einem bestimmten Produkt oder einer bestimmten Partei, nicht die vielen anderen Eigenschaften der Probanden wie Gewicht, Größe, Religionszugehörigkeit etc.

Den Hintergrund der Thermodynamik bilden Vielteilchen-Systeme wie z.B. Gase. Von  $N$  "nummerierten" Gasmolekülen sei z.B. jedes entweder in Behälter  $L$  (links) oder Behälter  $R$  (rechts). Ein Mikro-Zustand bestünde hier also aus der Angabe, wo sich jedes einzelne Molekül befindet, links oder rechts. Als Makro-Zustand können wir dann die vergrößerte Beschreibung einführen, in der nur spezifiziert wird, wieviele Moleküle,  $N(L)$ , im Behälter  $L$ , wieviele,  $N(R)$ , in Behälter  $R$  sind.

Wir betrachten ein einfaches Beispiel mit  $N = 4$  Kugeln; sie sollen auf die beiden Behälter verteilt sein. Jede Kugel sei eindeutig beschriftet mit a, b, c oder d. Dann kann  $N(L)$  entweder 0, 1, 2, 3, oder 4 sein. Zu  $N(L) = 0$  gibt es nur einen Mikro-Zustand, zu  $N(L) = 1$  vier Mikrostände (nämlich Teilchen a oder b oder c oder d ist in  $L$ ). Für  $N(L) = 2$  gibt es 6 Paare (ab, ac, ad, bc, bd, cd). Dieser Zustand der Gleichverteilung,  $N(L) = N(R) = 2$  hat also die höchste Zahl von Mikrozuständen, die größte Entropie.

Nun seien alle Mikrozustände gleich wahrscheinlich: Gleiche Wahrscheinlichkeit kann man sich realisiert denken durch einen Prozess: In einem großen Sack seien alle Mikrozustände aufbewahrt. Wenn ich nun blind hineingreife, hole ich einen der Zustände heraus, aber ohne jede Bevorzugung. Ich notiere den Zustand und lege ihn zurück. Das Spiel wird fortgesetzt. Aud diese Wei-

---

<sup>8</sup>Die Entropie ist also keineswegs etwas Mysteriöses, sie hängt aber ab von der Definition Makro/Mikro. Diese Unterscheidung ist nicht eindeutig.

se schwankt nun auch der Makrozustand. Die Gleich-Verteilung ist aber am wahrscheinlichsten, da sie die meisten Mikro-Realisierungen hat. Diese Auszeichnung wird umso ausgeprägter, je größer  $N$ . Implizit entsteht dadurch ein Zeitpfeil: Übergänge zwischen Makrozuständen sind viel wahrscheinlicher, wenn dabei die Entropie anwächst, als wenn sie abnimmt. Für ein Gas mit  $N = 100$  Milliarden wird jede Abweichung von der Gleichverteilung extrem unwahrscheinlich: Gleich-Verteilung wird zum Ziel – und zum stabilen Endpunkt der Entwicklung (“Wärmetod”). Im Gleichgewicht gibt es keine Veränderung und daher keine Zeit mehr. Jedoch laufen auch im Gleichgewicht permanent Austauschvorgänge ab zwischen verschiedenen Mikrozuständen. “Die Ruhe ist nur scheinbar”, eine Konsequenz der (gewählten) vergrößerten Beschreibung.

Beides, die gerichtete Makro-Bewegung außerhalb des Gleichgewichts, und die zeitlose Stationarität im Gleichgewicht, sind wichtige Funktionen, die in vielen Bereichen der Physik ausgenutzt werden.

## 7.2 Quantenmechanischer Zeitpfeil

Basis des quantenmechanischen Zeitpfeils ist eine fundamentale Unbestimmtheit: In der Quantenmechanik können nicht alle möglichen Eigenschaften eines Teilchens oder eines Systems “gleichzeitig” realisiert sein. Das gilt z.B. für das Eigenschaftspaar “Ort”  $x$  und “Geschwindigkeit”  $v$ . Aber wie wird darüber entschieden, welche Eigenschaft gegeben ist, welche nicht? Dies geschieht über geeignete Messungen: Wenn ich frage, wo sich ein Teilchen befindet, hat das Teilchen hinterher einen gewissen Ort, nicht vorher. Die Geschwindigkeit ist dann aber nicht definiert; man sagt das Teilchen befände sich bezüglich der Geschwindigkeit in einem Überlagerungszustand (Superposition). Offensichtlich ist aber nach dem Messprozess der Ausgangszustand nicht mehr rekonstruierbar: Der Prozess ist irreversibel, d.h. es gibt einen Zeitpfeil vom Zustand vor der Messung zum Zustand nach der Messung.

Auch in der klassischen Mechanik sind Messungen notwendig, und diese sind als Messung irreversibel. Messungen setzen den thermodynamischen Zeitpfeil voraus insofern, als das Messergebnis als Fakt registriert sein muss; die Stabilität der Registratur basiert auf der Relaxation in ein Gleichgewicht. In der klassischen Mechanik bestätigen die Messungen jedoch nur Eigenschaften, die bereits vorher existierten. Der quantenmechanische Zeitpfeil ist zusätzlich und entsteht auf Grund der unvermeidbaren Mess-Rückwirkung auf das gemessene Objekt.

## 7.3 Kosmologischer Zeitpfeil

Kosmologie behandelt “Geschichte im Großen”, die Geschichte unseres Uni-

versums. Eine Retrodiktion ist möglich insofern als der heutige Zustand des Universums durch seine Vergangenheit (zumindest im Groben) determiniert ist. Als Eingabe benötigt man einschlägige Messdaten und Theorien (effektive Bewegungsgleichungen).

Prinzipiell lassen sich folgende Kosmologie-Strukturen unterscheiden:

1. Definierter Beginn und langsame “Degeneration” (zunehmende Unordnung).
2. Definierter Beginn und allmählicher “Fortschritt” (zunehmende Ordnung).
3. Zyklisches Universum (keine globale Zeitordnung).
4. Stationäres Universum (geschichtslos).

Welche Struktur ist nun am wahrscheinlichsten? Nach heutigem Kenntnisstand ist es das Modell (1). Als spezielle Anfangsbedingung gilt der sogenannte “Big Bang” (der große Knall), die darauf folgende Expansion des Universums definiert den kosmologischen Zeitpfeil. Durch die Expansion wird die vorschnelle Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts zwischen Materie und Strahlung unterdrückt. Eine Analogie: Wenn ich das Volumen eines Zylinders sehr rasch ausdehne, hat das darin befindliche Gas keine Zeit, den Gleichgewichtszustand mit überall konstanter Teilchendichte zu erreichen. Nichtgleichgewicht ist ein wesentliches Kennzeichen unseres Kosmos – und Voraussetzung für die Entstehung von Leben.

Dem kosmologischen Zeitpfeil wird im Reigen der übrigen Zeitpfeile oft eine Sonderrolle zugewiesen. Schließlich verweist er auf das Verhalten des Universums als Ganzem. Entgegen manchen vorschnellen Modell-Überlegungen etwa von S. Hawking, legt die Richtung des kosmologischen Zeitpfeils aber keineswegs die Richtung der anderen Zeitpfeile fest, d.h. bei der Umkehrung des ersteren (d.h. Übergang zur Kontraktion des Universums) würde sich z.B. der thermodynamische Zeitpfeil nicht umdrehen, die Unordnung (Entropie) nähme weiterhin zu. Die naive Vorstellung, dass dann alles rückwärts lief, Menschen jünger würden und kaputte Teetassen sich spontan zum makellosen Ganzen zusammenfügten, entbehrt jeder physikalischen Grundlage.

Die anderen Kosmologie-Strukturen sind damit keineswegs erledigt. Vom Standpunkt biologischer Systeme könnte man auch das Modell (2) favorisieren. Und Roger Penrose schlägt in seinem jüngsten Buch, *Cycles of Time*, wieder eine zyklische Kosmologie vor.

## 7.4 Strahlungszeitpfeil

Strahlung stellt ein Phänomen der Feldtheorie dar. Hier geht es nicht um diskrete Teilchen, sondern um kontinuierliche Beschreibungen von Anregungszuständen. Beispiele sind elektromagnetische Felder (Licht), Schallwellen, Wasserwellen und ähnliches. Typischerweise haben die Feldgleichungen Lösungen auch im sonst “freien Raum”, vgl. etwa die Ausbreitung von Licht durch das Vakuum (z.B. von den Fixsternen zu uns). Trotzdem ergibt sich natürlich die Frage nach den Quellen (Emitter) und Senken (Absorber) solcher Felder. Auf globalem Maßstab (Kosmologie) gehen wir davon aus, dass die elektromagnetischen Felder nicht einfach existierten, sondern emittiert wurden. Auslaufende Wellen dominierten.

Die Bevorzugung dieser Anfangsbedingung (auslaufende statt einlaufende Wellen) findet sich sozusagen auch im Alltag wieder. Die Präparation von Oberflächenwellen auf einem See mag dies verdeutlichen. Durch einen Stein kann ich sehr einfach kreisförmige Wellen erzeugen, die sich bis zum Seerand ausbreiten, wo sie teilweise absorbiert bzw. reflektiert werden. Das umgekehrt verlaufende Anregungsmuster ist dagegen außerordentlich schwer zu realisieren: Die delokalisierte Anregung über den gesamten Seerand und das konzentrische Rücklaufen der Welle hin zu einem zentralen Punkt. Obwohl natürlich beide Lösungen erlaubt sind, ist der (technische) Aufwand für die Bereitstellung entsprechender Randbedingungen extrem unterschiedlich (Symmetriebrechung). Daraus folgt eine Art operationaler Zeitpfeil, es werden im wesentlichen nur auslaufende Wellen beobachtet, nicht der umgekehrte Prozess.

## 7.5 Biologischer Zeitpfeil

Was sind biologische Systeme? Die Debatte ist und bleibt kontrovers. In jüngerer Zeit haben sich zwei Charakteristika in den Vordergrund geschoben: Biologische Systeme sind “offen”, d.h. gekennzeichnet durch Austauschprozesse mit der Umgebung, und sie sind kontrolliert durch Information (eine Art genetische Programmierung).

Im Bereich der unbelebten Natur bleibt Information eher ein Fremdkörper. Anders in der Technik (Computer-gesteuerte Maschinen): Hier wie in der Biologie spielt die Bereitstellung neuartiger, wohl-definierter Funktionen eine dominierende Rolle. Die Implementierung solcher Funktionen ist nun typischerweise einem Optimierungsprozess unterworfen.

Im Fall biologischer Systeme wird die Optimierung durch das sogenannte Darwin-Prinzip (“Survival of the Fittest”) beschrieben. Dieses Prinzip wird realisiert durch ein Wechselspiel zwischen zwei Modell-Ebenen: Ebene 1 (Phänotyp) und Ebene 2 (Genotyp, Information). Das Wechselspiel führt schließlich zu einer Art Rückkopplung und definiert Zyklen in Form von Generationsfolgen. Diese Zyklen erlauben es, Bewahrung (Erblichkeit)

und Fortschritt (Anpassung an die Umgebung) miteinander zu verbinden. Durch Selektion und Adaption entsteht so ein Prozess in Richtung hin zu höherer Ordnung und damit ein Zeit-Pfeil.

Entgegen der naiven Erwartung widerspricht dieser biologische Zeitpfeil jedoch nicht dem thermodynamischen. Insgesamt, d.h. für das System des Lebens einschließlich seiner unmittelbaren Umgebung, nimmt die Entropie zu. (Man beachte, dass nicht nur die Lebewesen für sich, sondern auch diese zusammen mit ihrer Umgebung ein offenes System darstellen.)

## 7.6 Psychologischer Zeitpfeil

Wir erinnern uns an die Vergangenheit, nicht an die Zukunft. Diese Symmetriebrechung erscheint nahezu trivial, sie ist verknüpft mit begrenzten Interventions-Möglichkeiten ausgedrückt durch folgendes "Dilemma":

(1) Man erinnert sich an Ereignisse in der Zukunft (Vergangenheit); (2) Ereignisse sind beeinflussbar. Nicht beide Sätze können wahr sein, Beeinflussbarkeit und Erinnern als Fakt (also Unveränderbarkeit) sind logisch nicht vereinbar. Operational verhält sich Zukunft komplementär zur Vergangenheit, es ergibt sich somit ein Zeitpfeil.

Erinnerung bedeutet Gedächtnis, wobei die Bedeutung des Gedächtnisses für das Leben, insbesondere menschliches Leben, kaum überschätzt werden kann. Eine auch nur ansatzweise vollständige Behandlung liegt außerhalb dieser knappen Diskussion. Hier soll es ausschließlich um die (stark vereinfachte) Speicher-Analogie gehen.

Technische Informationsspeicher finden sich z.B. in einem Computer. Deren Wirkungsweise ist gut verstanden. Die Speicherung ist letztlich ein irreversibler Vorgang im Sinne der Thermodynamik, d.h. die Ordnung des Speichers selbst nimmt zwar zu, insgesamt aber wächst die Entropie an: Einen Zweizustandsspeicher können wir uns als Doppelmulde vorstellen; um gezielt in eine der Minima zu gelangen, müssen wir in der Lage sein, die Barriere zu überwinden, dann aber die Überschussenergie loswerden. Nur so ist der Rückweg versperrt, der Endzustand stabilisiert. Die Überschussenergie geht in ein "kaltes" Bad; Speicherung ist funktional irreversibel. Der psychologische Zeitpfeil ist somit rückführbar auf den thermodynamischen.

## 8. "Zeitumkehr"

Auch wenn die gemessene Zeit nicht umkehrbar ist: der damit verbundene Effekt lässt sich leicht simulieren. Man nehme den interessierenden Prozess mit einer Filmkamera auf und lasse danach den Film rückwärts laufen. Das ist äquivalent der formalen Zeitumkehr  $t \rightarrow -t$ .

Statt der direkten Zeitumkehr kann man alternativ nach der Prozess-Umkehr fragen. Ist es möglich, den Übergang von Zustand  $E$  nach Zustand  $F$  umzukehren? Bei einem periodischen Vorgang wäre dies trivial, aber warum geht das nicht immer? Es ist die Frage nach der Natur der Irreversibilität und des damit verknüpften Zeitpfeils. Warum komme ich vom Scherbenhaufen nicht so ohne weiteres zurück zur intakten Teetasse?

Eine erste Antwort kann sich auf ein Unvollständigkeitsmodell im Sinne des Abschnitts 7.1 berufen. “Intakt” gegenüber “zertört” sind eindeutig Makro-Beschreibungen. Die intakte Tasse  $E$  wird repräsentiert durch einen bestimmten Mikro-Zustand, zur zerstörten Tasse  $F$  gehören dagegen sehr viele verschiedene (mögliche) Mikrozustände (unterschiedliche Scherben). Die Entropie nimmt also von  $E$  nach  $F$  zu. Würde man die Mikro-Zustände immer wieder aufs Neue zufällig auswählen, so wäre es wahrscheinlicher, von  $E$  nach  $F$ , als von  $F$  nach  $E$  zu gelangen.

Diese Antwort wirkt jedoch ziemlich gekünstelt. Eine zweite Antwort gelingt in Analogie zum Abschnitt 7.4. Hier betrachten wir Prozesse, die gemäß mechanischer Bewegungsgleichung sozusagen von selbst ablaufen. Um einen solchen mechanischen Prozess umzukehren, bleibt dem Experimentator also nur, dessen Anfangsbedingungen “plötzlich” und sehr genau neu einstellen. Je mehr Teilchen beteiligt sind (bei einem Gas wären das leicht viele Milliarden Moleküle), umso höher wird der Aufwand, umso schwieriger wird die vollständige Realisierung. Kleine Fehler schaukeln sich auf. Der Prozess-Umkehr scheidet also nicht prinzipiell, sondern graduell mit wachsendem Aufwand; letztlich geht es um Kontrollmangel bedingt durch endliche Ressourcen, die dem Experimentator zur Verfügung stehen.

## 9. Zeit-Reisen

In der Literatur haben Zeitreisen ihren festen Platz. Bekannte Beispiele sind Ch. Dickens, “Eine Weihnachtsgeschichte”, H. G. Wells, “Die Zeitmaschine”, sowie der Film, “Und täglich grüßt das Murmeltier”. In der Physik gehören Zeitreisen sicherlich zu den umstrittensten Konzepten im Bereich der Raum-Zeit-Struktur. Ein wesentliches Kennzeichen von Zeitreisen ist die Verletzung der globalen Zeitordnung: Vorher, nachher, Vergangenheit und Zukunft werden mehrdeutig.

Wir haben einige der seltsamen Eigenschaften der speziellen Relativitätstheorie diskutiert (Abschnitt 5 und 6). Man könnte vielleicht erwarten, dass diese Eigenschaften letztlich auch zu Zeitreisen ausgenutzt werden könnten. Dies ist nicht der Fall: Die Zeitordnung gegebener Prozesse bleibt bei jedem denkbaren Wechsel des Bezugssystems erhalten.

Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie sind dagegen – unter sehr

speziellen Bedingungen – Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen möglich, die zu sogenannten “Zeitschleifen” führen. Ein konkretes Modell mit rotierender Materie wurde 1949 von dem berühmten Mathematiker Kurt Gödel vorgeschlagen. Hier liefe also die Zeit in sich zurück, ähnlich, wie man im Ortsraum zu ein und dem gleichen Punkt zurückgelangen kann. Dieses Rücklaufen in der Zeit definiert aber eine sehr strikte Selbstkonsistenz-Bedingung: Nach einem vollen zeitlichen Umlauf muss der Zustand des Systems exakt wieder der gleiche sein. Das ist unverträglich mit jeder Irreversibilität, also insbesondere mit der Zeitmessung als solcher, aber auch mit den Prozessen des Lebens.

Typische Science Fiction Szenarien fordern aber noch weit mehr: nämlich die Koexistenz von Systemen mit und ohne Zeitordnung. Eine Zeitmaschine  $Z$  mit dem Zeitreisenden an Bord besucht das “normale System”  $N$  (unsere Erde) in dessen Vergangenheit. Hier ergeben sich zahlreiche Probleme. Zum einen muss die komplette Vergangenheit von  $N$  “existieren” wie dessen Gegenwart, eine Extravaganz, die sonst nirgendwo benötigt wird und für die es keinerlei empirische Belege gibt. Dann drohen auch noch kausale Inkonsistenzen, z.B. das viel-diskutierte “Großvater-Paradoxon”<sup>9</sup>, und schließlich sind Verletzungen von Erhaltungsgrößen nicht ausgeschlossen<sup>10</sup> Während reine Zeitschleifen wohl als prinzipiell möglich (wenn auch praktisch irrelevant) akzeptiert werden müssen, sind solche beliebigen Kombinations-Szenarien aus  $N$  und  $Z$  im höchsten Maße fraglich. Und nicht zuletzt: Zeitreisende sind uns bisher noch nie begegnet<sup>11</sup>. Wie bereits angemerkt, müssen Inkonsistenzen als starke Hinweise auf fehlerhafte theoretische Konzepte gelten. Lassen sich diese Inkonsistenzen nicht beseitigen, ist das Spekulationsmodell Zeitreise zu verwerfen.

## 10. Kausalität und Willensfreiheit

Bereits in den bisherigen Beispielen war immer wieder vom Beobachter, vom Agenten die Rede. Schließlich sind wissenschaftliche Aussagen “von jemanden für jemanden”. In diesem letzten Abschnitt soll die Rolle des Beobachters/Agenten und die Frage seiner Einbettung in die Welt nochmals aufge-

---

<sup>9</sup>Gemäß dieses Paradoxons reise ich in die Vergangenheit, um meinen eigenen Großvater umzubringen ...

<sup>10</sup>In der Vergangenheit, z.B. von letzter Woche, treffe ich auf mich selbst, werde also verdoppelt.

<sup>11</sup>Wie in der Weihnachtsgeschichte von Dickens müsste man wohl mindestens annehmen, dass der Zeitreisende zwar Wahrnehmungen machen darf, aber selbst nicht gesehen wird und auch nicht in das lokale Geschehen eingreifen kann. Fürwahr eine seltsame “Geister-Geschichte”!

griffen werden.

Konstitutiv für die Naturwissenschaften ist die Trennung von Subjekt und Objekt. Wir beobachten und analysieren unsere Umgebung (von der wir uns damit ausschließen). Dieses Beobachten ist aber nicht notwendig passiv: Wir greifen ein (basierend auf unserem freien Willen) und studieren die Konsequenzen im Sinne des Kausalitätsprinzips. Ein solches Vorgehen ist u.a. auch Grundlage für die diversen Mess-Szenarien der Physik.

Was aber heißt freier Wille? Zwei unterschiedliche Auffassungen werden vertreten. Zum einen die "isolierte" Modellvorstellung: Charakteristisch für den freien Willen des Agenten  $Ag$  ist (1) die Wahl von  $Ag$  ist unabhängig von äußeren Beingungen, (2) die Wahl ist "gewollt" durch  $Ag$ . Zum anderen die "eingebettete" Modellvorstellung: Hier wird der freie Wille gesehen als effektive Eigenschaft einer hochwertigen konzeptionellen Intelligenz; die Wahl erfolgt "aus guten Gründen".

Was heißt Intervention von  $Ag$  (Kausalität)? Auch hier kann man zwei Auffassungen unterscheiden. Wieder die isolierte Modellvorstellung: Eine bestimmte Ursache führt zu einem bestimmten Effekt (und definiert damit einen Zeitpfeil). Und die eingebettete Modellvorstellung: Die Welt wird als hierarchisch gegliedert aufgefasst; damit ergibt sich sowohl eine "Bottom-up"-, wie auch eine "Top-down"- Verursachung. Erstere geht von niedriger Ebene zur höheren, letztere von der höheren zur niederen. Auch diese Kausalität definiert noch immer gewisse Zeitpfeile, aber Ursachen und Effekte erscheinen bis zu einem gewissen Grad austauschbar.

## Zusammenfassung

Es ist sicher nahezu unmöglich, die Problematik der Zeit von allen Seiten her erschöpfend behandeln zu wollen. In diesem Beitrag habe ich mich auf einige wesentliche physikalische Aspekte beschränkt. Selbst diese Aspekte sind zum Teil kontrovers.

Die extreme Position, nach der die Zeit eine Illusion sei, ist zwar in manchen Physikerkreisen recht populär, doch wenig überzeugend. Zu schwer ist die Bürde, aus einer zeitlosen Welt den allgegenwärtigen Eindruck zeitlicher Dynamik zu rekonstruieren.

Empirisch gut vertretbar ist dagegen der Ausgangspunkt, demzufolge die Raumzeit relational aufzufassen wäre, also abhängig von Materie (und nicht einfach ein passives Gefäß für die Materie). Die physikalische Zeit ist eine "Prozess-Größe", keine Zustandsgröße<sup>12</sup>. Der konstituierende Uhren-Prozess

---

<sup>12</sup>Jede Zustandsgröße ist eine Funktion ausschließlich des momentanen System-Zustandes, unabhängig von dessen Veränderung.

ist so zu optimieren, dass die Bewegungsgleichungen der Physik möglichst einfach werden. Dieses Programm scheint zu gelingen, die so definierte Zeit darf als “gemeinsame Währung” für all diese Bewegungsvorgänge aufgefasst werden. Es gibt keine von einander unabhängige Zeiten mit jeweils eingeschränktem Gültigkeitsbereich.

Der Uhren-Prozess ist jedoch subtiler, als es zunächst scheint, da er eine streng periodische Bewegung mit einer irreversiblen Komponente, dem Zählen der Perioden, verknüpfen muss. Der Uhrenprozess enthält daher bereits einen Zeitpfeil, er ist funktional irreversibel. Gemäß der speziellen Relativitätstheorie gibt es jedoch keine “Master-Uhr”, keine allgemeingültige Metrik. Die Taktrate sonst identischer Uhren hängt davon ab, von welchem (materiellen) Bezugssystem aus man sie beobachtet. Jede Uhr geht am langsamsten in ihrem eigenen Ruhesystem. Es gibt also keine allgemeine Gleichzeitigkeit.

Zeitpfeile sind Ausdruck von Symmetriebrechungen. Die Nicht-Umkehrbarkeit kann unterschiedliche Ursachen haben: Ein allgegenwärtiger Aspekt ist die Unvollständigkeit jeder physikalischen Beschreibung; zugänglich ist nur ein (in der Regel winziger) Teil des gesamten Universums. Typischerweise ist die Dynamik solcher offener Systeme – anders als die abgeschlossener Systeme – nicht mehr Zeitumkehr-invariant. Hinzu kommen spezielle Anfangsbedingungen (kosmologischer und thermodynamischer Zeitpfeil), Kontrollmangel bezüglich Ziel-Funktion (Strahlungszeitpfeil), funktionale Irreversibilität wie bei der Speicherung (quantenmechanischer Messprozess, psychologischer Zeitpfeil) oder der Selektion (biologischer Zeitpfeil).

Auch die Zeit-Umkehr als Prozess-Umkehr wird begrenzt durch den allgegenwärtigen Kontrollmangel, d.h. durch beschränkte Ressourcen. Zeitreisen (Zeitschleifen) sind im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie prinzipiell möglich. Eine Voraussetzung ist aber die Selbstkonsistenz beim Schließen der Schleife; diese Bedingung ist jedoch unvereinbar mit jeder Art von Irreversibilität, also insbesondere mit biologischen Prozessen.

Ein Zeitpfeil unterliegt schließlich auch dem Konzept der Kausalität. Zwar unterstützen die Gleichungen der Physik dieses Konzept nicht direkt; aber deren Lösungen definieren oft eine zeitliche Richtung, die sich interpretieren lässt als ein kausales Verhältnis: aus Anfangszustand A folgt Zustand B. Diese Beschreibung wird noch nützlicher, wenn der Beobachter/Agent den Anfangszustand A präparieren und damit die Entstehung von B “bewirken” kann. Diese Intervention setzt eine Art “freien Willen” voraus.

Ich danke Herr Professor Hermann Haken, Stuttgart, für den außerordentlich fruchtbaren Gedankenaustausch.

## Literatur

P. Davies, *About Time: Einstein's Unfinished Revolution*, Simon & Schuster paperback edition, 2005

C. Callender, *Ist Zeit eine Illusion?*, Spektrum der Wissenschaft, Okt. 2010, p. 33

S. Hawking, *Eine kurze Geschichte der Zeit*, Rowohlt 2011