

# Rechtsgeschichte

[www.rg.mpg.de](http://www.rg.mpg.de)

<http://www.rg-rechtsgeschichte.de/rg10>  
Zitiervorschlag: Rechtsgeschichte Rg 10 (2007)  
<http://dx.doi.org/10.12946/rg10/063-073>

Rg **10** 2007 63–73

**Ulrich Schollwöck**

## Warum hat Zeit eine Richtung?

## Abstract

A surprising finding of physics is that the ubiquitous observation of physical processes which are irreversible, like the dissolution of a substance in a liquid, have no counterpart in the microscopic laws in physics which indicate that time is directionless and allow for a reversal of the direction of time. This seemingly negates our empirical observation that an open future contrasts with a fixed past. The existence of a direction or arrow of time is explained in modern physics as a statistical phenomenon: while at the microscopic level reversibility holds, at a macroscopic level the numbers of microscopic arrangements that correspond to one macroscopically observable state of the world are so vastly different that a statistical drift from less likely to more likely states turns into deterministic evolution. The direction of time is therefore an emergent phenomenon upon the advent of complexity in macroscopic physical systems. Various arguments have been raised against this picture, but can be shown to be either empirically irrelevant or, more interestingly, to be refuted by the coarse graining or summarizing of world information that is a key aspect of human perception – which finds its motivation in symmetries and almost constant quantities in physics.



## Warum hat Zeit eine Richtung?

»Zögernd kommt die Zukunft hergezogen,  
Pfeilschnell ist das Jetzt entflohen,  
Ewig still steht die Vergangenheit.«

Vielleicht noch mehr als das Phänomen der Zeit selbst hat Menschen seit jeher die Beobachtung beschäftigt, dass Zeit – anders als Raum – in drei scharf getrennte Bereiche zu zerfallen scheint: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Auch im Raum gibt es vermeintlich ähnliche Einteilungen in rechts und links, vorne und hinten, oben und unten. Diese Einteilungen sind von der Position und Orientierung des Beobachters abhängig, so wie auch die Einteilung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft vom Beobachter abhängt. Dieser Relativismus stößt aber im Fall der Zeit sofort an Grenzen. Während die Gegenwart selbst, der Augenblick, nahezu ohne Ausdehnung zu sein scheint, erscheinen Vergangenheit und Zukunft als ausgedehnt, wobei Zukunft permanent in Vergangenheit verwandelt wird. Zeit scheint also in eine Richtung zu fließen, ist durch einen gerichteten Zeitpfeil gekennzeichnet. Der fundamentale Unterschied zum Raum – wo man eine beliebige Raumachse ebenso mit einer Richtung versehen kann – besteht darin, dass man sich im Raum beliebig hin und auch wieder zurück bewegen kann, was in der Zeit nicht möglich scheint. Ist dieser gerichtete Charakter der Zeit eine Illusion der menschlichen Wahrnehmung oder in den Gesetzen der Physik verankert?

Zeit hat aber nicht nur gerichteten Charakter, sondern auch historischen Charakter: Während die Zukunft prinzipiell offen zu sein scheint, liegt die Vergangenheit insgesamt fest und ist in ihrem Verlauf durch in der Gegenwart vorliegen-

de Dokumente (Schriftstücke, Kunstwerke, Fossilien) zumindest ansatzweise dokumentiert. Ewig still steht die Vergangenheit, so Friedrich Schiller.

### *Ein Zeitpfeil ohne Zeit?*

Was hat die moderne Physik zum Problem des Zeitpfeils und der Historizität zu sagen? Der noch viel schwierigeren Frage nach dem Wesen der Zeit »an sich« möchte ich ausweichen. Es ist nämlich durchaus denkbar, dass diese Frage vielleicht nicht nur schwierig, sondern sogar irreführend ist. Sicherlich kann man die Orte und Geschwindigkeiten von materiellen Objekten als Funktionen einer Größe Zeit durchgehend ausdrücken. Stellen wir uns das Pendel einer alten Standuhr vor; dann können wir den Ort der Pendelspitze und die Geschwindigkeit der Pendelspitze in Abhängigkeit von der Zeit graphisch darstellen – Physiker verwenden anstatt der Geschwindigkeit lieber den Impuls, das ist die Masse des Objekts multipliziert mit seiner Geschwindigkeit. Offensichtlich können wir aber auch eine direkte Zuordnung zwischen Ort und Impuls der Pendelspitze vornehmen: Befindet sich die Pendelspitze am Ort  $x$ , so hat sie einen Impuls  $p$ . Dabei ist es denkbar (man betrachte das gedämpfte Pendel), dass zum gleichen Ort  $x$ , der immer wieder besucht wird, jeweils verschiedene Impulse  $p$  gehören: Der Nullpunkt (wenn das Pendel senkrecht hängt) wird mit immer geringerer Geschwindigkeit (Impuls) durchlaufen. Auf jeden Fall kann man die Größe »Zeit« aus der Beschreibung des Pendels eliminieren und die tatsächlich messbaren Größen Ort und Impuls unmittelbar miteinander verbinden. Es entsteht eine Kurve im »Orts-Impuls-Raum«.

Dabei wird die Kurve in einer bestimmten Richtung durchlaufen. Aus Sicht der klassischen Physik ist mit dieser Information alles über das Pendel aussagbar gesagt, also keine Information verloren gegangen. Diese Beobachtung ist keine akademische Spielerei: In der Tat können wir »Zeit« selbst nie direkt messen, sondern nur durch (bequemerweise) periodische Veränderungen physikalischer Systeme indirekt festnageln – zum Beispiel durch das Pendel unserer Standuhr, dessen Bewegung im Uhrwerk zur Zeitmessung umgesetzt wird. Diese Beobachtung hat Physiker wie Ernst Mach gegen Ende des 19. Jahrhunderts dazu geführt, zu fordern, man solle das dann doch eher okkulte Konzept der Zeit aus der Physik eliminieren, im Sinne eines Ockhamschen *entia non sunt multiplicanda sine necessitate*. Die Entfernung nicht messbarer Größen aus dem physikalischen Weltbild hat in der Tat später zu bahnbrechenden Fortschritten geführt. Dass man die Zeit nicht eliminiert und überhaupt Zeit wie eben erwähnt durch Referenzstandards festlegen kann, hat damit zu tun, dass wir empirisch erfahren, dass auch völlig unabhängige physikalische Vorgänge durch *eine* Zeit parametrisiert werden können. Dies würde nahe legen, das Konzept Zeit als physikalisches Konzept durchaus ernst zu nehmen. Eine sehr schwierige Frage, die auf tiefe ontologische und epistemologische Probleme führt, die bis heute keine zuverlässige Antwort erfahren haben. Interessanterweise ist die Existenz einer Richtung in der »Zeit« von der eben geführten Diskussion unabhängig: Stellen wir uns vor, wir würden die Richtung der Zeit umdrehen können – wir filmen die Pendelbewegung und lassen den Film rückwärts ablaufen. In der Denkweise, die das Konzept »Zeit« explizit verwendet, folgen wir dann den Orts- und Impulskurven in entgegengesetzter Richtung; wir sehen als Ergebnis, dass sich die ehemals ge-

dämpfte Pendelschwingung immer weiter aufschaukelt. Die Impulse müssen zusätzlich noch in ihrer Richtung umgekehrt werden: Läuft der Film rückwärts, so kehren sich die Richtungen der Geschwindigkeiten um. In der Denkweise ohne explizite Zeit muss man die Impulse ebenfalls umkehren, durchläuft die Orts-Impuls-Kurve aber wieder in einer festen Richtung: Die ursprünglich gedämpfte Pendelbewegung schaukelt sich wiederum auf. Eine quantifizierbare Ordnung des Vorher und Nachher lässt sich also auch ohne vorherige Einführung eines Zeitbegriffs herstellen.

Im Folgenden werden wir dennoch der der Alltagserfahrung näheren ersten Denkweise folgen und die (unverstandene) Existenz von Zeit als eines die Dynamik der Welt treibenden Parameters annehmen, aber betonen, dass – wenn auch sprachlich umständlicher – sich alle folgenden Überlegungen in eine zeitfreie Sprache bringen lassen.

#### *Umkehrbare Zeit*

Auch das Konzept der Zeitrichtung scheint uns zu entgleiten, sobald wir einen genaueren Blick auf die Grundgesetze der Physik werfen. Wie wir gleich sehen werden, ist nirgends in den Grundgesetzen der Physik eine Zeitrichtung oder gar das Konzept einer Historizität enthalten. Jedenfalls nicht auf den ersten Blick! Vielleicht auf den zweiten Blick? Wir werden sehen, dass uns die Suche nach dem Zeitpfeil auf zunächst völlig unverbundene, aber sicher ebenso tiefe Fragen führt, etwa nach dem Wesen von Information, der Bedeutung unvollständigen Wissens über die Welt oder etwa der Frage, ob das Universum ein Gedächtnis hat – sofern man sich hemmungslos anthropomorpher Begrifflichkeiten bedienen mag.

Dass es ein Problem mit einer gerichteten Zeit geben mag, ahnt auch der wissenschaftliche Laie, der als Kernaussage der Einsteinschen Relativitätstheorie behalten hat, dass Raum und Zeit keine voneinander getrennte Existenz führen, sondern in einem gewissen Maße sogar ineinander umgewandelt werden können: Was einem Beobachter im Universum als ein räumlicher Abstand erscheint, kann einem anderen Beobachter zumindest teilweise als zeitlicher Abstand erscheinen. Wie auch immer sich das im Detail darstellen mag, so stellt sich doch unmittelbar die Frage, wie man eine gerichtete Größe in eine ungerichtete verwandeln kann und umgekehrt. Hier scheint doch eine fundamentale Inkonsistenz, eine begriffliche Unstetigkeit zu liegen!

Nicht aus Sicht der Physik: Im Gegensatz zu jeglicher Alltagswahrnehmung kennt die Physik keine Richtung in der Zeit. Um dies zu erkennen, ist es nicht nötig, in die *arcana* der Quantenmechanik einzusteigen: Alles kann bereits an der Newtonschen Mechanik erkannt werden, die man in der Schule kennengelernt hat: *actio* gleich *reactio*, usw. Für uns entscheidend ist das zweite Newtonsche Gesetz, Kraft  $F$  gleich Masse  $m$  mal Beschleunigung. Dieses Gesetz reguliert die gesamte Mechanik, Planetenbewegungen ebenso wie unsere Standuhr. Beschleunigung ist nichts anderes als die Änderung der Geschwindigkeit in der Zeit. Betrachten wir einen möglichst kleinen Zeitraum  $\Delta t$  und die in dem Zeitraum erfolgte Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ . Die Beschleunigung ist dann nichts anderes als der Quotient  $\Delta v / \Delta t$  und wir haben

$$F = m (\Delta v / \Delta t)$$

Eine Umkehrung der Zeitrichtung besteht nun darin, aus  $\Delta t$  einfach  $-\Delta t$  zu machen. Offensichtlich kann man das Newtonsche Gesetz dann retten, ohne an den fundamentalen Kräften zu

spielen, indem man die Änderung der Geschwindigkeit ebenso umkehrt. Aus  $\Delta v$  wird  $-\Delta v$  und die beiden Vorzeichen kompensieren sich. Im anschaulichen Bild entspricht dies einfach dem bereits bemühten rückwärtslaufenden Film. Physikstudenten zeigt man in diesem Zusammenhang gerne Filme von Gasmolekülen in einem Kasten, die sich im Kasten bewegen und wie Billardkugeln aneinander stoßen. Ob der Film vorwärts oder rückwärts läuft, kann man hier nicht unterscheiden. Der Physiker spricht von Zeitumkehrinvarianz.

Wir können nun zu Recht einwenden, dass Physiker wie Nichtphysiker auch schon rückwärts laufende Filme gesehen haben, in denen Milchtropfen aus der Kaffeetasse aufsteigen, eine zersprungene Vase sich wieder magisch zusammensetzt, und so weiter – die gewisse Komik, die manchen dieser Filme innewohnt, kommt natürlich daher, dass uns unsere Welterfahrung lehrt, dass so etwas nicht vorkommt. In der Tat werden wir über Unterschiede zwischen diesen zwei Arten von Filme nachdenken müssen und erkennen, dass hier der Schlüssel zur Richtung des Zeitpfeils liegt.

Bevor wir damit beginnen, noch eine weitere Beobachtung: Im Newtonschen Gesetz werden lediglich die augenblicklich wirkende Kraft und die Änderung der Geschwindigkeit im selben Zeitpunkt in Beziehung zueinander gesetzt; Werte und Änderungen der Geschwindigkeit oder auch andere Informationen aus früherer Zeit tauchen nicht auf. Mathematisch gesprochen, muss man in der Newtonschen Mechanik lediglich die Orte und Geschwindigkeiten der Teilchen im Augenblick wissen, um die gesamte Zukunft ohne Rekurs auf die Historie, die früheren Orte und Geschwindigkeiten, berechnen zu können. Die Vergangenheit spricht zur Zukunft nur durch die Gegenwart, die außer ihrem

So-sein, das natürlich das Ergebnis der Vergangenheit ist, keine Erinnerung an die Vergangenheit hat. Diese Eigenschaft einer zeitlichen Dynamik nennt der Mathematiker *markovsch*. Von Historizität zunächst keine Spur!

Die Beobachtung, dass die Grundgesetze der Physik zeitumkehrinvariant sind, aber in der Realität stets eine Zeitrichtung vorliegt, durchzieht die gesamte Physik: Es gibt, je nach zugrunde liegender Theorie, einen elektrodynamischen, einen quantenmechanischen und einen kosmologischen Zeitpfeil, die zu dem eben besprochenen sogenannten statistischen Zeitpfeil hinzutreten, obwohl sowohl Elektrodynamik wie auch Quantenmechanik zeitumkehrinvariant sind. Aufgrund der Konsistenz unserer physikalischen Weltbeschreibung können diese Zeitpfeile nicht voneinander unabhängig sein – eine Art Oberpfeil könnte nach Ansicht vieler Physiker durch den kosmologischen Zeitpfeil gegeben sein, der mit dem Urknall seinen Anfang genommen hat und sich unter anderem in der Expansion des Universums widerspiegelt. Diese innere Konsistenz erlaubt es mir, mich auf einen der Pfeile zu konzentrieren, den statistischen Zeitpfeil, den wir von allen am besten verstehen und der unserer Alltagserfahrung am nächsten steht.

*Der Zeitpfeil als  
statistisch emergentes Phänomen*

Eine erste Erkenntnis bereits des späten 19. Jahrhunderts war es, dass die Emergenz einer Zeitrichtung, die offensichtlich nicht in den mikroskopischen Grundgleichungen evident ist, statistische Ursache haben muss. Während der mikroskopische Film der einzelnen Gasmoleküle zeitumkehrinvariant ist, ist es der makroskopische Film der zerbrechenden Vase offensichtlich nicht.

Am Rande sei bemerkt, dass wir hier paradigmatisch beobachten können, dass – obwohl wir puren Reduktionismus betreiben – auf einer neuen Komplexitätsebene nicht nur quantitative, sondern qualitativ-konzeptionelle Veränderungen der Weltbeschreibung auftreten können: In der Komplexität emergente Konzepte wie der Zeitpfeil sind nicht Teil der Grundgleichungen, doch in irgendeiner Form bereits immanent. Zum Beleg dieses »more is different« muss man übrigens gar nicht philosophisch schwierige Konzepte wie den Zeitpfeil bemühen. Dass es sich bei dem Konzept »Temperatur« um keine philosophische Abstraktion handelt, weiß jeder, der schon einmal an eine heiße Herdplatte gefasst hat. Dennoch: Temperatur hat keine mikroskopische Natur (man kann also z.B. einem einzelnen Gasatom keine Temperatur zuschreiben), kommt in keinem Grundgesetz der Physik vor, ergibt sich aber in mathematisch vollständig nachvollziehbarer und objektiver Weise aus diesen Gesetzen, sobald Komplexität hinzutritt. Interessanterweise sind die Pfade von mikroskopischer Abwesenheit von Zeitrichtung und Temperatur zu ihrer makroskopischen Ubiquität sehr ähnlich.

Wie kann man so ein komplexes System beschreiben? Um möglichst einfach vorgehen zu können, bleiben wir in der klassischen Physik. Ein System von  $N$  Teilchen ist in der klassischen Physik vollständig beschrieben und im Prinzip in seiner Dynamik für alle Zukunft festgelegt, wenn wir von jedem Teilchen den Ort (3 Variable im dreidimensionalen Raum) und die Geschwindigkeit (bzw. den Impuls, ebenfalls 3 Variable) kennen. Insgesamt sind also  $6N$  Variablen festzulegen. Eine mögliche Veranschaulichung für ein Teilchen, das sich nur auf einer (eindimensionalen) Schiene bewegen kann, wäre durch ein Koordinatensystem gegeben, wo auf der einen

Achse der Ort, auf der anderen Achse die Geschwindigkeit (bzw. der Impuls) aufgetragen wird. Ein Punkt in diesem Koordinatensystem entspricht einem Zustand der Welt, die hier nur aus einem einzigen Teilchen besteht. Nehmen wir ein zweites Teilchen auf der Achse hinzu, können wir zeichnerisch nur eine der beiden weiteren benötigten Achsen bewältigen (und auch das nur in einer räumlichen Projektion), aber im Prinzip ist klar, man müsste einen sogenannten Phasenraum mit  $6N$  Achsen zeichnen und darin einen Punkt spezifizieren. So ein Punkt legt den Zustand der Welt in allen mikroskopischen Details fest, man spricht vom Mikrozustand.

Alternativ könnten wir einen Raum mit 6 Achsen zeichnen (3 für den Ort, 3 für den Impuls) und für jedes Teilchen einen Punkt in diesem Raum entsprechend seines Ortes und seines Impulses markieren. Insgesamt wären also  $N$  Punkte einzutragen. Beschränkten wir uns auf die Ortsachsen, erhielten wir ein Bild von der räumlichen Verteilung der  $N$  Teilchen. Die Dynamik eines physikalischen Systems drückt sich in der ersten Repräsentation in einer Wanderung des einen Punktes (des Mikrozustandes) im Phasenraum aus, in der zweiten durch die Schwarmbewegung aller  $N$  Punkte. In diesem Zusammenhang führt die Physik das Konzept der Wahrscheinlichkeitsdichte ein: Im Beispiel vieler Teilchen, die sich nur auf der  $x$ -Achse bewegen können, würde man Ort und Impuls jedes einzelnen Teilchens ins selbe Bild eintragen, das dabei zweidimensional bleibt. Wie bei einer Vielzahl einzelner Regentropfen auf der Straße wird aus einer Punktwolke ein Kontinuum, und man gibt nicht mehr die Position jedes einzelnen Punktes im Diagramm an, sondern nur die lokale Häufigkeit (Dichte) der Punkte. Man nennt diese Dichte auch Wahrscheinlichkeitsdichte. Eine vollständige Kenntnis dieser Wahrscheinlich-

keitsdichte und ihrer Dynamik entspricht einer vollständigen Weltkenntnis.

Wenn wir nun ein Glas Wasser betrachten (etwa  $10^{23}$  Teilchen, eine 1 mit 23 Nullen), ist offensichtlich, dass wir die Werte aller Variablen weder wissen können noch wollen. Die offensichtliche praktische Unmöglichkeit ist klar: Würden wir etwa die Positionen der Wassermoleküle auf 1 Angström (das ist in etwa die Größe eines Atoms,  $10^{-10}$  m: 10 Milliarden Atome aneinandergelegt ergeben einen Meter) festlegen, so müssten wir (bei einer Darstellung im üblichen Computerformat von 8 Byte pro Zahl) 2,4 mal  $10^{24}$  Bytes abspeichern. Das entspricht etwa  $10^{15}$  DVDs, etwa 1 Million DVDs pro Erdbewohner. Selbst bei weiteren unerhörten technologischen Revolutionen, die diese Speichermenge erlaubten, wäre nichts wirklich gewonnen: Die Chaostheorie hat uns gelehrt, dass bereits kleinste Ungenauigkeiten in unserem Wissen über den augenblicklichen Zustand des Wassers im Glas Voraussagen auch über die nähere Zukunft bereits unmöglich machen. Selbst atomare Auflösung der Molekülpositionen ist bei weitem zu ungenau; wir laufen also einer Chimäre hinterher. Es ist aber auch gar nicht notwendig, dies zu tun: Offensichtlich ist das Glas Wasser durch das Volumen  $V$  des Wassers, seine Temperatur  $T$ , die Molekülzahl  $N$  (bzw. seine Masse) für alle Alltagszwecke und übrigens auch aus Sicht der Physik (sofern wir uns auf die sogenannten Gleichgewichtseigenschaften beschränken) hinreichend beschrieben. Ein so beschriebenes physikalisches System befindet sich in einem sogenannten *Makrozustand*.

#### *Makro- und Mikrozustände*

Machen wir uns nun diese makroskopische Sichtweise, die die feinen Details ignoriert, zu

eigen, so ist offensichtlich, dass es viele Möglichkeiten gibt, einzelne Moleküle umzuordnen, mit anderen Impulsen zu versehen, ohne dass sich an den eben eingeführten makroskopischen Eigenschaften irgendetwas ändert. Dennoch entspricht jede dieser neuen Möglichkeiten oder Teilchenkonfigurationen einem anderen Mikrozustand: Der Punkt im Phasenraum wird seine Position geändert haben. Etwas salopp ausgedrückt, schauen aus makroskopischer Sicht viele mikroskopische Zustände »gleich« aus: In der Sprache der Physik sagt man, dass es zu einem Makrozustand eine (wie wir sehen werden, gigantische) Zahl makroskopisch ununterscheidbarer *kompatibler* Mikrozustände gibt. Für unsere Überlegungen zur Richtung des Zeitpfeils ist aber nun entscheidend, dass die jeweilige Zahl kompatibler Mikrozustände für verschiedene Makrozustände der Welt unter Umständen extrem unterschiedlich ist. Um eine Ahnung von der Bedeutung des Wortes »extrem« zu bekommen, betrachten wir ein Gas aus  $N$  Teilchen (es seien wieder  $10^{23}$  Teilchen), das in einen Behälter mit Volumen  $V$  eingeschlossen ist. Mikrozustände zeichnen sich durch eine vollständige Angabe aller Orte und Impulse aus; ignorieren wir im Folgenden die Impulse zur Gänze. Greifen wir uns ein Gasteilchen heraus: Wie viele verschiedene Mikrozustände kann dieses Teilchen annehmen? Hier treffen wir *en passant* auf eines der großen Wunder der Physik: Die Zahl der Mikrozustände wird hier offensichtlich die Zahl der verschiedenen Positionen im Raum sein, die für das Teilchen denkbar sind. Doch was heißt verschieden? Wenn sie um einen Moleküldurchmesser differieren? Um ein Zehntel? Oder darf man etwas gröber herangehen? Diese Frage ist *a priori* nicht beantwortbar, aber offensichtlich müssen wir einen solchen Minimalabstand, bzw. in drei Dimensionen verallgemeinert, ein Mini-

malvolumen  $V_0$  einführen: Die Zahl der Mikrozustände beträgt dann  $V/V_0$  für dieses eine Teilchen. Dass man ein solches Volumen einführen muss, folgt auch aus sogenannten Dimensionsgründen: Während  $V$  die Dimension »Volumen« (d. h.  $m^3$ ) hat, ist die Zahl der Mikrozustände dimensionslos, d. h. ohne Maßeinheit. Diese Inkonsistenz kann nur durch die Einführung einer weiteren volumenartigen Größe beseitigt werden. Das große Wunder besteht nun darin, dass diese sehr einfache Überlegung der statistischen Physik die Einführung eines solchen Minimalvolumens erzwingt, obwohl aus Sicht der klassischen Physik eigentlich Orte wie auch jede andere Messgröße Teil eines Kontinuums bilden: Die geringste Veränderung des Ortes führt zu einem anderen, im Prinzip unterscheidbaren, Ort. Hier wird offensichtlich eine grundlegendere Theorie als die klassische Physik antizipiert. In der Tat: Die viel später aufgestellte Quantenmechanik zeigt ganz geradlinig, dass es (aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation) ein wohldefiniertes Minimalvolumen gibt – der Korrektheit halber sei hinzugefügt, dass dieses Minimal»volumen« in Wirklichkeit ein Produkt aus Volumina im Orts- und Impulsraum ist; wir wollen das einfach ignorieren. Betrachten wir nun das gleiche Gas in einem Behälter doppelten Volumens  $2V$ . Dann gibt es für das einzelne Teilchen offenbar  $2V/V_0$  Mikrozustände, also zweimal so viele wie vorher – und beruhigenderweise fällt bei diesem Vergleich das mysteriöse Minimalvolumen (bei dem wir offensichtlich etwas geschummelt haben) wieder aus der Rechnung heraus. Da aber nun  $10^{23}$  Teilchen im Gas sind, gilt unter der Annahme, dass die Teilchen voneinander (fast) nichts merken, dass diese Verdoppelung der Zahl der Mikrozustände für jedes Teilchen unabhängig gilt. Zwei Teilchen haben also bereits viermal so viele Mikrozu-





*kehreinwand* von Zermelo sowie der *Umkehr-einwand* von Loschmidt. Der Wiederkehr-einwand von Zermelo betrifft die Feststellung, dass man zeigen kann, dass in einem abgeschlossenen physikalischen System (und als solches wollen wir das Universum einmal auffassen) jede Konfiguration des Systems mit Wahrscheinlichkeit eins, also sicher, nach einer endlichen Zeit durch die Dynamik des Systems wieder auftauchen wird. Dieser Einwand ist zwar prinzipiell korrekt, doch kann man abschätzen, dass schon ein paar hundert Teilchen ausreichen, um den Zeitpunkt dieser Wiederkehr, die sogenannte Poincaré-Zeit, das Alter des Universums weit übersteigen zu lassen. Da diese Zeitskala mit der Teilchenzahl exponentiell rasch zunimmt, ist dieser Zeitpunkt im realen Universum mit etwa  $10^{83}$  Teilchen in die unendlich ferne Zukunft gerückt.

Pragmatisch problematischer ist der Loschmidtsche Umkehr-einwand. Er besagt ganz einfach, dass jenseits der Argumentation über Wahrscheinlichkeiten für Makrozustände die Welt genau einen Pfad von einem Mikrozustand jetzt zu einem anderen Mikrozustand später nimmt, der aufgrund der Umkehrbarkeit der physikalischen Grundgesetze genauso wahrscheinlich ist wie der Umkehrpfad. Wieso sollte es also aus den oben beschriebenen Gründen eine Zeitrichtung geben? Den Loschmidtschen Umkehr-einwand kann man auch anders formulieren, indem man feststellt, dass das Maß an Information, die in einem Zustand der Welt enthalten ist, im Laufe der Zeit weder zu- noch abnimmt. Zur Illustration betrachten wir wieder unser Glas Wasser, in das wir einen Tropfen Tinte hineingeben. Die vollständige Information über den Verbleib des Tropfens Tinte ist bekannt, wenn wir die Position und den Impuls aller Tintenpartikel im Wasser angeben. Die

Zahl der Partikel nimmt weder zu noch ab, die Informationsmenge ist daher konstant. Wo taucht eine Zeitrichtung auf? Dieser Einwand gewinnt noch an Interesse, wenn man hinzunimmt, dass – ganz kurz gefasst – aus Sicht der Physik Entropie und Information nur die zwei Seiten ein- und derselben Medaille zu sein scheinen – wo bleibt der zweite Hauptsatz von der Zunahme der Entropie in der Welt? Auf jeden Fall haben wir die Intuition, dass es leichter ist, die Information über den Tropfen Tinte zumindest in groben Zügen zu spezifizieren, d. h. den Tintentropfen zu beschreiben, solange der Tropfen noch Tropfenform hat (unmittelbar nach dem Zugeben), als wenn man die Tinte verrührt hat und sich zahllose Tintenschlieren durch das Glas ziehen. Physikalisch kann man diese Intuition auf sichere mathematische Beine stellen, indem man ein sogenanntes *coarse graining* durchführt, eine Vergröberung der vorliegenden Information. Dies ist eine Technik, die wir Menschen im Alltag ständig anwenden: Wir fassen etwa die Information eines Computerbildschirms nicht als Menge einzelner farbiger Pixel auf, sondern extrahieren Grobinformationen, die wir als Muster bezeichnen – z. B. Buchstaben oder Icons. Genau hier liegt eine wesentliche Verarbeitungsleistung des Gehirns, die zum Beispiel Autisten nur in eingeschränktem Maße leisten. Im Beispiel der Tinte vergrößern wir, indem wir nicht so genau hinschauen, also unser Gesamtvolumen in eine Vielzahl kleiner Volumina aufteilen und nur die mittlere Zahl und den mittleren Impuls von Tintenpartikeln in diesen kleinen Volumina betrachten. Dabei werden diese kleinen Volumina immer größer gewählt, die Information also immer mehr vergrößert. Die Informationsmenge nimmt dabei drastisch ab, aber der Unterschied zwischen Tropfen und verrührter Tinte ist robust: Ein Tropfen bleibt ein

Tropfen, d. h. ab einer gewissen Vergrößerung wird nur ein einziges Teilvolumen gefüllt sein, während sich die vermischte Tinte auf allen Skalen als vermischt, d. h. in allen Teilvolumina anwesend, präsentiert. Unser Weltwissen ist immer das Resultat einer solchen Vergrößerung, wobei die vorhin angegebene Beschreibung des Glases Wasser allein durch Volumen, Molekülzahl und Temperatur bereits die extremste noch physikalisch relevante Vergrößerung darstellt. Entscheidend ist für uns jetzt die folgende Überlegung: Auf mikroskopischer Ebene mit vollständiger Information gilt Zeitumkehr – könnte es sein, dass die menschliche Operation mit unvollständiger Information die Zeitrichtung generiert? Dieser Ansatz ist nicht rein subjektiv, denn was relevante Information ist, ist kein Zufall, sondern typischerweise persistente Information, die sich nur langsam ändert: Während sich etwa die Position der Wassermoleküle in einer Sekunde millionenfach geändert hat, ändert sich zum Beispiel die Temperatur des Wassers auf der Skala von Minuten. Die Physik lehrt uns, dass derartige relevante Information im Verhältnis zur Gesamtinformation nur einen infinitesimalen Bruchteil, viel weniger als die Spitze eines Eisbergs, ausmacht. Könnte uns dieser Aspekt helfen, auch etwas über die Historizität der Zeit auszusagen – die Gesetze der Physik sind ja zunächst markovsch, d. h. gedächtnislos?

#### *Relevantes und irrelevantes Weltwissen*

In diesem Zusammenhang erweist es sich als praktisch, nicht die Darstellung physikalischer Systeme im Phasenraum, sondern die alternative Darstellung im sechsdimensionalen Raum der Wahrscheinlichkeitsdichte zu wählen, weil es sehr viel schwieriger ist, am einzelnen Punkt im Phasenraum das Konzept der Vergrößerung fest-

zumachen. Bereits seit dem neunzehnten Jahrhundert ist bekannt, dass die zeitliche Änderung der vollständigen Wahrscheinlichkeitsdichte der sogenannten Liouville-Gleichung genügt. Diese Gleichung ist wiederum im direkten Anschluss an die zugrunde liegenden Gleichungen markovsch und ahistorisch: Es kommt für Änderungen nur auf das Hier und Jetzt an.

Versuchen wir nun eine einfache Vergrößerung der Weltbeschreibung durch die Wahrscheinlichkeitsdichte, indem wir sie in einen relevanten und einen irrelevanten Anteil aufspalten. Der relevante Anteil könnte etwa die mittlere Teilchendichte pro Kubikzentimeter sein, der irrelevante Anteil die Abweichungen von dieser mittleren Dichte auf allen kleineren Längenskalen. Diese letztlich willkürliche Zerlegung können wir zu jedem Zeitpunkt vornehmen. In einer gewagten Analogie könnten wir an eine Zerlegung der neuronalen Zustände unseres Gehirns in diejenigen denken, die uns bewusst sind – eine verschwindende Minderheit – sowie diejenigen, die unbewusst bleiben. Wie im Gehirn, so hängt auch in der Welt die Dynamik der relevanten, uns zugänglichen Information von beiden Informationsformen ab, der relevanten genauso wie der irrelevanten, was die Willkür der Zerlegung akzeptabel macht. Um starten zu können, müssen wir zunächst die vorhandene Anfangsinformation klassifizieren. Wenn wir im Ursprung des Universums starten und dabei an den Urknall denken, so wissen wir, dass die Welt zum Zeitpunkt  $0$  in einem hochsingulären Zustand war, der zunächst keine irrelevante Information enthielt. Wir starten also mit ausschließlich relevanter Information. Berechnet man nun die Dynamik der relevanten Information, so erhält man zwei Beiträge, die man leicht interpretieren kann:

Den ersten Beitrag leistet die momentane relevante Weltinformation. Ihr Einfluss auf die

zukünftige relevante Weltinformation ist sowohl zeitumkehrinvariant wie auch markovsch. In der Analogie zum Gehirn entspräche er einer Änderung des bewussten Anteils unseres Gehirns aufgrund seines eigenen augenblicklichen Zustands.

Spannender ist der zweite nicht-markovsche Beitrag: Zur relevanten Weltinformation trägt auch in nichttrivialer Weise die relevante Weltinformation zu allen früheren Zeitpunkten bei. Hier taucht die Historizität der Zeit auf dem Niveau der relevanten Weltinformation auf; da der erste Beitrag zeitumkehrinvariant ist, hat der zweite Beitrag auch die Nichtumkehrbarkeit des Zeitpfeils zur Folge. Zu jedem Zeitpunkt in der Vergangenheit wird relevante Information einer zeitlichen Dynamik unterworfen und dabei zum Teil in irrelevante Information umgewandelt – vergleichbar dem sich auflösenden Tintentropfen. Diese irrelevante Information trägt aber später wieder zur Dynamik der relevanten Information bei.

Es kommt also zunächst zu einer Drift von relevanter Information zu irrelevanter Information. Dabei hat die unendlich viel größere Kapazität der irrelevanten Information zur Folge, dass es sich hier *de facto* um eine Einbahnstraße handelt, auch wenn irrelevante Information wieder in relevante Information zurückverwandelt wird. Aufgrund der sehr geringen Informationskapazität der relevanten Information handelt es sich dabei nur um Zufallstreffer: Um der allgemeinen Drift der Information ins Irrelevante zu entgegnen, muss es geradezu zu einer Verschwörung unter den irrelevanten Informationen kommen, um gezielt zur Relevanz zurück zu gelangen. Im Bild des Tintentropfens: Egal, wie wir rühren, wir werden ihn im Wasser auflösen (wobei dieser Zustand auf mikroskopischer Ebene jeweils anders aussehen wird). Umgekehrt gibt es sicher auch einen Weg des Umrührens,

der den Tropfen wiederherstellt, aber es ist nur ein einziger für die vorgefundene Mischung. Ihn vollständig zu gehen, ist beliebig unwahrscheinlich. Die verbleibende teilweise Rückdrift ins Relevante ist letztlich, was der Welt Gedächtnis und Historizität gibt, wobei wir bei unseren Dokumenten diese Drift letztlich gezielt steuern.

Die Vorstellung einer gerichteten Zeit folgt also auch dann aus ungerichteten Naturgesetzen, wenn wir nicht nur – wie in der Diskussion über die Expansion eines Gases – Anfangs- und Endzustände unmittelbar vergleichen, sondern auch wenn wir die dabei ignorierte Dynamik, die den Ausgangszustand sich in den Endzustand verwandeln lässt, berücksichtigen, auch wenn diese Diskussion hier nur sehr oberflächlich ausfallen konnte. Schlüssel war dabei, dass unser Weltwissen immer nur einen minimalen Bruchteil des Gesamtweltwissen darstellen wird, nur die makroskopische Spitze des Eisbergs. Diese gibt es, weil Erhaltungssätze und Symmetrien der Natur einzelne Freiheitsgrade gegenüber anderen langlebiger und damit makroskopisch relevant, also auch für unser Überleben wichtig machen. Die Richtung des Zeitpfeils ist dann ein statistischer Effekt makroskopischer Natur. Umgekehrt gilt, dass sich die Richtung der Zeit umso stärker auflöst, je mehr unser Weltwissen dem vollständigen Wissen über die Welt entspricht. In Beispiel des Films von der Bewegung einzelner Gasmoleküle kann man in der Tat die Richtung der Zeit nicht mehr feststellen: weil man »alles« weiß.

Was das Wesen der Zeit selbst ist? Wer weiß es! Eine verlockende Überlegung wäre es, nicht nur dem Zeitpfeil, sondern auch der Zeit an sich solchen statistisch emergenten Charakter zuzuschreiben, die empirische Kohärenz einfacher periodischer Vorgänge im Universum auf statistische, rein zufällige Prozesse auf subatomarer Skala mit einer Nettodrift zurückzuführen, bei

der dann – wie bei der statistischen Erklärung des Zeitpfeils – das Gesetz der großen Zahlen aus Wahrscheinlichkeit Sicherheit macht. Vielleicht hätte dann doch Albert Einstein Recht gehabt: »Für uns gläubige Physiker hat die Un-

terscheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion.«

**Ulrich Schollwöck**

