

Die Richtung der Zeit

Thomas Neusius

Die Vergangenheit war ja Gegenwart, die Zukunft wird Gegenwart sein. In der Zeit findet sich also nur geordnete Gegenwart.

NIKOLAUS VON KUES: De docta ignorantia

Das obige Zitat entspricht unserem Empfinden und die Aussage des Cusanus scheint auf den ersten Blick nichts besonderes zu sein. Schon Augustinus hat ähnliche Überlegungen angestellt. In den Jahrhunderten, die auf Cusanus folgten, wurde die moderne Naturwissenschaft entwickelt, und dabei kam auch der Zeitbegriff in die Diskussion. Für Galilei und Newton war Zeit eine absolute Größe, unabhängig vom Ort, die jedem Ereignis zugeordnet werden kann. Daß diese Sicht der Zeit nicht allen Beobachtungen gerecht wird, wurde Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts gezeigt.

Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion.

ALBERT EINSTEIN¹

In seiner Speziellen Relativitätstheorie postulierte Einstein eine Abhängigkeit der Zeit vom Ort, später zeigte er zudem die Verbindungen der Zeit zu Kraftfeldern bzw. zur Energie. Seiner Einschätzung zufolge war die unterschiedliche Wahrnehmung der Zeit gegenüber den Dimensionen des Raums eine Einbildung des Menschen. Es war für ihn betrüblich, daß die Wahrnehmung des Menschen und ihre Funktionsweise kaum kompatibel mit seinem Zeitbegriff zu sein schien. Einstein befürchtete, daß die Beziehung zwischen menschlichem Bewußtsein, der Wahrnehmung des Augenblicks, die unser Erleben bestimmt, und dem physikalischen Zeitbegriff außerhalb der Erkenntnismöglichkeiten der Naturwissenschaft liege. Dies ist jedoch hier nicht das Thema.

Ein weiterer Aspekt in Cusanus' Sichtweise der Zeit ist die Annahme, daß Vergangenes eindeutig von Geschehendem oder Zukünftigem unterschieden werden kann. Dies ist physikalisch keineswegs eine Offensichtlichkeit. Man stelle sich ein Video vor, das gespielt wird, ohne zu wissen, ob es vorwärts oder rückwärts läuft. Wann ist man in der Lage, zu entscheiden, ob es die normale oder der entgegengesetzte Richtung ist?

¹Kondolenzschreiben für Michael Basso (1955)

Ein anfahrender Zug, könnte genausogut ein rückwärtslaufender abbremsender Zug sein. Ein Tropfen Milch im heißen Kaffee jedoch wird eindeutigen Aufschluß über die Zeitrichtung geben. Was unterscheidet die beiden Filme?

Viele andere Beispiele in der Alltagserfahrung bestätigen jedoch, daß es Phänomene gibt, die nur in einer Zeitrichtung ablaufen: Das Zerschlagen eines Glases kennen wir alle, daß sich das Glas spontan wieder zusammensetzt dürfte noch niemand beobachtet haben. Der heiße Tee kühlt ab und erwärmt seine Umgebung, nie jedoch erwärmt er sich, in dem er seine Umgebung abkühlt, ebenso wenig wie ein warmes Bier im sommerlichen Biergarten spontan kalt. Schließlich erinnern wir uns an unsere Vergangenheit und nicht an die Zukunft.

Vom physikalischen Standpunkt aus gesehen werden Bewegungen materieller Körper durch Gleichungen beschrieben (partielle Differentialgleichungen), deren Lösungen das zeitliche Verhalten beschreiben. Prinzipiell gibt es für jede Lösung auch eine Lösung in entgegengesetzter Zeitrichtung.² Dennoch werden in unserer Lebenswirklichkeit bestimmte Vorgänge nur in einer Zeitrichtung beobachtet (Milch im Kaffee). Wir sind jedoch nur in der Lage, dies wahrzunehmen, wenn unser Bewußtsein ebenso eine feste Zeitrichtung hat, mit der wir vergleichen können. Gerade diese Zeitrichtung in unserem Empfinden ist es aber, die uns die Unterscheidung von Vergangenheit und Zukunft ermöglicht und somit hinter Cusanus' Äußerung steht.

Aus physikalischer Sicht gibt es verschiedene Bereiche, die mit der Richtung der Zeit in Verbindung stehen. Stephen Hawking unterscheidet in seiner *Kurzen Geschichte der Zeit* zwischen drei Zeitpfeilen: Dem Zeitpfeil des Bewußtseins, dem thermodynamischen Zeitpfeil und dem Zeitpfeil des Kosmos.

Der kosmologische Zeitpfeil beruht auf der Beobachtung, daß sich das Universum seit dem Urknall ausdehnt. Dies mag einen Zeitpfeil bedingen. Unter der Annahme, daß das Universum unter seiner eigenen Masse kollabieren und sich schließlich wieder zusammenziehen wird, bedeutete dies, daß sich in dieser Phase der kosmischen Entwicklung die Zeitrichtung umkehrte – wie es von Hawking auch vertreten wird.

Neben den drei von Hawking genannten Zeitpfeilen ist eine weitere Zeitasymmetrie durch die Interpretation der Quantenmechanik bedingt: Die Annahme, eine Messung verändere die Beschaffenheit des betrachteten Objekts, führt zu einer Zeitasymmetrie, da es nicht möglich ist, durch „Vergessen“ den ursprünglichen Zustand wieder herzustellen.³

²Genauer gesagt handelt es sich hier um die CPT-Symmetrie.

³Wie unten ausgeführt, sind die Grundgleichungen der Quantenmechanik zeitumkehrin-

Es gibt noch weitere Vorgänge, die im Zusammenhang mit dem Zeitpfeil zu untersuchen wären. Im folgenden soll jedoch der thermodynamische Zeitpfeil im Mittelpunkt stehen, da er die größte Rolle für alltägliche Vorgänge spielt und vermutlich der Ursprung der Zeitrichtung der menschlichen Wahrnehmung ist.

Damit es wenigstens auf dem Feld der physikalischen Definition keine Verwirrung gebe, sei hier die Zeit schlicht das, was mit einer Uhr gemessen werden kann.⁴ Ziel der physikalischen Beschreibung ist es, die beobachteten Phänomene auf möglichst wenige, möglichst einfache Gesetze zurückzuführen. Ein solches systematisches Vorgehen war beispielsweise Newtons Mechanik, die neben Grundannahmen über Symmetrie und die Beschaffenheit von Raum und Zeit auf einem einzigen Gesetz fußte, daß nämlich die zeitliche Änderung des Impulses gleich der Kraft sei. Dieses Gesetz ist symmetrisch in der Zeit, es kann aus ihm also nicht auf einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft geschlossen werden. Gleiches gilt für die fundamentalen Gesetze der Elektrodynamik (Maxwellgleichungen), der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie (Einstein Gleichungen) und der Quantenmechanik (Schrödingergleichung, Von-Neumann-Gleichung).

Ende des neunzehnten Jahrhunderts versuchte der Wiener Physiker Ludwig Boltzmann aus den mechanischen Gesetzmäßigkeiten einzelner Teilchen auf komplexes Verhalten von Systemen vieler Teilchen zu schließen. So wollte er Größen wie Druck und Temperatur erklären, die er als kollektives Verhalten vieler Teilchen deutete.

Nehmen wir an, wir haben ein System, daß die Zustände $z_1, z_2, \dots, z_n$ annehmen kann. Die Gesamtheit der möglichen Zustände sei die Menge M . Die Wahrscheinlichkeit, daß es sich im Zustand z_i befinde, sei p_i , mit

$$\sum_{i \in M} p_i = 1,$$

was bedeutet, daß die Summe über die Wahrscheinlichkeiten gleich eins ist: Das System muß sich also in irgendeinem Zustand z_i aus M befinden.

variant; die Assymetrie bezieht sich auf die Bedeutung des Meßvorgangs. Dies wird heute als das Einbringen von *Dekohärenz* durch den makroskopischen Meßapparat gedeutet und ist somit ähnlich begründet wie die Entropiezunahme durch Störungen von außen (siehe unten).

⁴Diese Definition empfinden manche Menschen als billige Ausflucht aus der begrifflichen Schwierigkeit. Es ist aber in den Naturwissenschaften der übliche und einzig mögliche Weg, eine objektive Beschreibung der Natur zu ermöglichen: Durch Definition eines Meßverfahrens werden Beobachtungsgrößen festgelegt.

Angenommen, wir kennen die Wahrscheinlichkeitsverteilung, und wollten nun durch Ja-Nein-Fragen den Zustand des Systems herausfinden, wie sollten wir vorgehen?

Um unsere Fragen zu symbolisieren, teilen wir M sukzessive in Untermengen, zwischen denen jeweils durch eine Frage entschieden wird, z. B. M_0 und M_1 und erstere weiter in M_{00} und M_{01} usw. bis jede Menge nur noch ein Ereignis enthält. Jedes Ereignis ist nun durch eine Folge von Einsen und Nullen bestimmt, die jedoch keinsfalls gleichlang sein müssen.

Unsere Taktik hat das Ziel, im Mittel möglichst wenige Fragen stellen zu müssen. Dazu legen wir die Mengen möglichst so an, daß jede Frage in 50% mit Ja bzw. in 50% mit Nein beantwortet werden wird.

Sei nach l Fragen die Menge M_b erreicht worden; dann gilt

$$\sum_{i \in M_{b0}} p_i = \sum_{i \in M_{b1}} p_i = 2^{-(l+1)}.$$

Wie gesagt, unterteilen wir M so lange bis in jeder Menge nur noch ein Ereignis z_i enthalten ist. Bis dahin sind l_i Fragen notwendig und wir erhalten schließlich

$$p_i = 2^{-l_i}$$

So berechnet sich umgekehrt l_i aus p_i

$$l_i = -\log_2 p_i.$$

Der so gewonnene Wert für l_i ist im allgemeinen nicht ganzzahlig, dies stört jedoch bei unserer Definition nicht. Als *fehlende Information* I bezeichnen wir den Erwartungswert von l_i , also die Zahl an Fragen, die wir im Mittel stellen müssen, um den Zustand des Systems mit Ja-Nein-Fragen herauszubekommen. Diese berechnet sich nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu

$$I = -\sum_i p_i \log_2 p_i = -\frac{1}{\ln 2} \sum_i p_i \ln p_i.$$

Diese fehlende Information ist im wesentlichen das Gleiche, was in der Physik als Entropie bezeichnet wird. Allerdings ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, daß die Entropie, wenn man sie über die fehlende Information einführt, mit dem Kenntnisstand des Beobachters zusammenhängt. Ein System hat demnach keine objektive Entropie mehr, vielmehr sagt die Entropie etwas darüber aus, was der Beobachter über das System weiß. Dies entspricht der Tatsache, daß

Entropie keine Meßgröße ist. Erst durch ein *Relevanzkonzept* ist es möglich, die Entropie mit Meßgrößen wie Temperatur oder Druck zu verknüpfen. Dieses Relevanzkonzept beinhaltet gerade eine Vorstellung davon, welche Größen als einer Beobachtung zugänglich betrachtet werden.

Diese Beobachterbezogenheit erinnert an die Quantenmechanik, liegt hier jedoch in der ungenügenden Meßgenauigkeit begründet und ist ohne Hinzunahme der Unschärferelation nicht von fundamentaler Natur. Im Ergebnis führt jedoch schon diese „klassische Unschärfe“ zu einem Zeitpfeil, wie sich gleich zeigen wird.

Es ist eine der zentralen Aussagen der Physik, daß die Entropie in abgeschlossenen Systemen niemals abnimmt. Umgekehrt könnte man auch sagen, daß durch die Zunahme der Entropie abgeschlossener Systeme die Richtung der Zeit definiert ist und in der Zeitrichtung unseres Bewußtseins die Entropie nur zunimmt. Die Zunahme der Entropie ist 1865 von Clausius erstmals postuliert worden (sog. 2. Hauptsatz der Thermodynamik). Anschaulich besagt sie, daß es unmöglich ist, ein *perpetuum mobile* (2. Art) zu bauen, oder daß es zum Beispiel unmöglich ist, daß ein Schiff dadurch angetrieben werden könnte, indem es dem Ozean Wärme entzieht.

Es stellt sich hier jedoch die Frage, wie es sein kann, daß die Entropie des Anfangszustand unter der Anwendung von zeitumkehrinvarianten Gesetzen abnehmen kann. Man würde erwarten, daß sie konstant bleibt. Entscheidend ist, daß wir vorhin vom Relevanzkonzept gesprochen haben, nach dem bestimmte Größen oder Eigenschaften des Systems als unbeobachtbar angesehen werden. Im Laufe der zeitlichen Entwicklung eines genügend komplizierten Systems, das zu Beginn in einem geordneten Zustand war, wird sich nun relevante Information in irrelevante verändern, die wir gemäß unseres Relevanzkonzeptes nicht in der Berechnung der Entropie berücksichtigen. Dadurch nimmt die Entropie zu. Zu rechtfertigen ist dieses Vorgehen durch die Tatsache, daß wir in der Natur, die wir zu beschreiben versuchen, keine wirklich perfekten abgeschlossenen Systeme beobachten. Tatsächlich kommt es immer zu kleinen Störungen durch den Rest des Universums⁵, die die irrelevanten Informationen zerstören.

Nehmen wir zur Verdeutlichung des Anwachsens der Entropie noch einmal unser Videobeispiel: Auf einem Band sei eine einzige Billiardkugel und ihr Weg auf dem Tisch zu sehen. Es dürfte schwierig sein, hier allein am Verhalten der Kugel die richtige Laufrichtung abzulesen. Anders wenn wir die Bewegung

⁵Diese Argumentation kann nicht auf das Universum als ganzes angewendet werden.

vieler Kugel auf einmal betrachten, die mit dem ersten Stoß in Unordnung gebracht wurden. Es ist zwar prinzipiell denkbar, daß die vielen Kugeln einer zufälligen Position zu einer geordneten (wie vor dem ersten Stoß) zusammenrollen. Dazu sind aber komplizierte Korrelationen der Kugeln nötig, die sich in „einer verschworenen Weise“ verhalten müßten. Solche Korrelationen werden bereits durch kleinste Störungen vernichtet, weshalb wir sie generell als irrelevant betrachten. Diese Unterscheidung zwischen *relevanter* und *irrelevanter* Information, die letztlich vom Beobachter festgelegt werden muß, ist der Ursprung der Entropiezunahme. An diesem Billiardbeispiel wird auch klar, daß es sich bei der Entropiezunahme um ein Phänomen großer Teilchenansammlungen handelt.

Ludwig Boltzmanns Ergebnisse, die die Zunahme der Entropie auf Basis der beschriebenen wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen hergeleitet hatten, wurde keineswegs kritiklos hingenommen. Da er auf Basis von atomaren Gesetzen argumentierte, die ihrerseits invariant unter Zeitumkehr waren, bezweifelte man zeitweilig die Existenz von Atomen, die Atomhypothese. Erst Einstein gelang es 1905 durch seine Arbeit zur Brownschen Bewegung die Zweifel der Kritiker wie z. B. Ernst Mach und Wilhelm Ostwald zu zerstreuen.

Ein weiterer Einwand wurde seinerzeit formuliert. Der französische Mathematiker Henri Poincaré hatte bewiesen, daß jedes noch so komplizierte endliche System nach einer gewissen Zeit in seinen Anfangszustand zurückkehren muß. Nach seinem heftigsten Verfechter wurde dieser Einwand als Zermelo-Paradoxon bzw. Zermeloscher Wiederkehrerwand bekannt. Auch er konnte jedoch Boltzmanns Einsichten nicht erschüttern, da die Wiederkehrzeiten ein vielfaches des Alters des Universums betragen.

Schließlich gab es den Umkehrerwand, vertreten vor allem von Loschmidt. Er beruht auf der Existenz der zeitgespiegelten Lösung wie oben bereits erwähnt. Dieser Einwand beruht auf folgender Beobachtung: Die Zunahme der Entropie wird begründet damit, daß es vielmehr ungeordnete Zustände als geordnete gibt. Da die Entropie der geordneten Zustände⁶ klein, die der ungeordneten Zustände groß ist, nimmt die Entropie zu. Es ist folgender Verlauf wahrscheinlich

Unwahrscheinlicher Zustand $\xrightarrow{t}$ Wahrscheinlicher Zustand.

Dieser Übergang repräsentiert das Anwachsen der Entropie. Jedenfalls dürfen

⁶Genauer müßte hier von *Ensembles* oder *Makrozuständen* die Rede sein, denn jeder reale Zustand (Mikrozustand) sollte die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen.

wir den Übergang

Unwahrscheinlicher Zustand $\xrightarrow{t}$ Unwahrscheinlicher Zustand

viel weniger erwarten. Es könnte aber auch

Wahrscheinlicher Zustand $\xrightarrow{t}$ Wahrscheinlicher Zustand

stattfinden, was viel wahrscheinlicher als der erste Fall wäre. Dies bedeutete eine gleichbleibende Entropie, die auch theoretisch nicht ausgeschlossen ist und dem sogenannten *Wärmetod* entspricht, also einem Zustand, der ein Entropie-maximum besitzt und somit alle Bewegungen zum Erliegen bringt. Dies sollte eigentlich der Zustand des Universums sein, er wird aber (noch) nicht beobachtet. Dafür, daß der erste Fall vorliegt benötigt man also noch eine nicht unmögliche (allerdings unwahrscheinliche) Ausgangslage, nämlich, daß das Universum in einem Zustand niedriger Entropie begonnen habe (im Ggs. zum Wärmetod als *Kaltgeburt* bezeichnet). Dies stellt eine zusätzliche Annahme dar.

Ein letzter Einwand ist der Prozeß, der die gleiche Wahrscheinlichkeit besitzt, wie der erste

Wahrscheinlicher Zustand $\xrightarrow{t}$ Unwahrscheinlicher Zustand.

Denn an ihm zeigt sich, daß wir durch unsere Annahme einer Kaltgeburt die Symmetrie zwischen Anfangs- und Endzustand aufgeben. Diese Inkonsistenz ist an sich für eine physikalische Argumentation nicht akzeptabel.

Um im Billiard-Beispiel zu sprechen: Für die Zunahme der Entropie müssen wir eine geordnete Position der Kugeln zu Beginn annehmen. Aber wieso sollten wir das erwarten können. wo eine solche Anordnung doch sehr unwahrscheinlich ist? Wer hat die Anfangsposition unseres Universums geordnet?

Literatur

HORNER, HEINZ: *Statistische Physik : Skript zur Vorlesung im WS2001/02.*
– Erhältlich auf www.tphys.uni-heidelberg.de/~horner

SCHWABL, FRANZ: *Statistische Mechanik.* – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2000.

ZEH, H. DIETER: *The Physical Basis of The Direction of Time.* – Berlin ; Heidelberg : Springer, 1999.