

Die Zeit heilt keine Wunden

1 Zeitverstellung

Die Zeit ist einzigartig in unserem Weltbild. Kein anderes Konzept ist gleichzeitig so offensichtlich im alltäglichen Leben wie enigmatisch in seiner fundamentalen Beschreibung. Es gibt noch viele Rätsel in der modernen Physik, wie die grundlegende Natur der Elementarteilchen oder das Schicksal des Universums und Schwarzer Löcher. Aber nach Teilchen, der Expansion des Universums, und Schwarzen Löchern müssen wir erst mühsam suchen. Die Zeit wird uns von der Geburt an aufgedrängt. Auch unsere Sprache hat die Zeit so verinnerlicht, dass ein Formulieren unmöglich zu sein scheint, ohne immer wieder auf zeitliche Begriffe zurückzugreifen — selbst wenn das Thema die Nichtexistenz der Zeit ist.

Physik und Philosophie haben sich schon lange und in vielfältiger Weise mit der Zeit beschäftigt. Verschiedene meist zirkelhafte und miteinander unverträgliche Vorschläge, die Zeit zu erklären, geben Zeugnis von ihrem schwierigerem, undurchdrungenem Charakter. So streitet der Fortschrittsglaube gegen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, und letzterer selbst ergibt keine eindeutige Erkenntnis über die Zeit, auch wenn er oft in diesem Sinne angewendet wird. Nimmt die Unordnung, quantifiziert als Entropie, mit der Zeit zu, oder ist es umgekehrt, und wir erleben die Zeit als linear fortschreitend, weil die zunehmende Unordnung zur Orientierung dient? Viele Ansichten, die über die Zeit geäußert wurden, helfen uns nicht, uns diese vorzustellen. Eher verstellen sie die Zeit.

Die Physik macht es sich oft gemütlich und umgeht ein konzeptionelles Problem gerne durch eine mathematische Beschreibung, die leider nicht immer das zugrunde liegende Wesen trifft. So wird die Zeit als reelle Zahl angesetzt, sich gleichmäßig vom negativen bis ins positive Unendliche erstreckend, um als Richtschnur für jegliche Veränderung zu dienen. Dieser Ansatz ist keine Erklärung der Zeit. Er ist ein ins Unendliche gestrecktes Bett des Prokrustes, mit dessen Hilfe wir der Zeit unsere eigene Meinung auferlegen. Die grundlegenden Eigenschaften werden mathematisch angenommen und in einer Weise in den Formalismus eingebaut, die ein tieferes Erkennen ausschließt.

Natürlich gibt es gute Gründe, die Zeit mathematisch linear und als reelle Zahl anzusetzen, denn so nehmen wir sie schließlich wahr. Wir wissen aber auch, dass unsere direkte Wahrnehmung wesentlich durch die Umgebung geprägt ist, in der wir uns biologisch und historisch entwickelt haben. Wahrnehmbarkeit spiegelt sich daher nur selten in grundlegenden physikalischen Eigenschaften wieder. So ist zum Beispiel der sichtbare Teil der elektromagnetischen Wellen nur deswegen sichtbar, weil in diesem Bereich die Erdatmosphäre die meisten Sonnenstrahlen hindurchlässt. Sichtbares Licht ist für unser tägliches Leben wichtig, aber relativ nebensächlich für das gesamte Universum. Vielleicht hat sich ja auch unser intuitives Zeitverständnis so entwickelt, dass es alltäglich hilfreich ist. Wenn dem so ist, so könnte uns dieser Ursprung leicht etwas vorgaukeln, von dem wir uns nur

schwer trennen können.

Die Quantenmechanik hat sich als effiziente Lehrmeisterin erwiesen, die uns immer wieder der Unzulänglichkeit alles Anschaulichen überführt. Ein bekanntes Beispiel ist Heisenbergs Unschärferelation, nach der der Ort und die Geschwindigkeit (oder, genauer, der Impuls) eines Objektes nicht beide beliebig genau gemessen werden können. Auch hier verführt uns der erste Anschein zu Unglauben, denn wir erwarten, dass technologischer Fortschritt uns einer idealen Messung von Ort sowie Impuls immer näher bringen sollte. Stattdessen gibt es eine fundamentale Grenze, die wir nicht umgehen können. Anschaulichkeit versagt hier, aber die Korrektheit dieser Grenze ist experimentell nachgewiesen worden. Selbst Schrödingers überspitzter Katzensgrusel findet mittlerweile ein Spiegelbild in gewissen Experimenten.

Aber auch die so gestrenge Quantenmechanik belässt uns in der Illusion einer einfachen, ewig fortschreitenden Zeit. Mathematisch bleibt diese weiterhin eine linear wachsende reelle Zahl, nicht, weil es eine fundamentale Einsicht wie die Unschärferelation gezeigt hätte, sondern weil wir die Theorie anders nicht konstruieren könnten, zumindest mit unseren derzeitigen Fähigkeiten. Die Zeit wird selbst von Quantenfluktuationen verschont, die sonst die Festen alles Fundamentalen erschüttern. So erhält die Zeit eine Sonderrolle, die ihr stur das ewige Fortschreiten ermöglicht.

Anders als die Quantenmechanik nimmt die Relativitätstheorie die Analyse von Raum und Zeit direkt zu ihrem Ziel. Sie weicht zumindest den gleichförmigen Fortschritt der Zeit auf und ersetzt ihn durch eine von Beobachtern abhängige Dilatation, aber die Zeit, so scheint es, läuft dennoch immer weiter voran. Die lineare Natur der Zeit mit einer klaren Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft wird in der Relativitätstheorie noch weiter ausgebaut, markiert durch die Struktur des Lichtkegels, der die reell-lineare Modellierung der Zeit gleichzeitig verallgemeinert und mit der Zeitdilatation verträglich macht. Wenn auch nur schwer erkennbar, trägt die Relativitätstheorie aber auch den Keim einer erstaunlichen Einsicht in sich, die unsere gewöhnliche Zeitvorstellung der Unzulänglichkeit entlarvt.

2 Zeitungeheuer

Kurt Gödels Konstruktion einer Raum-Zeit als Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie, in der die Zeit sich in einen Kreis schließt, bedeutet das Ende unseres zu vereinfachten Zeitverständnisses [1]. Lokal, in kleinen Bereichen der Raum-Zeit wie dort, wo unsere Wahrnehmung sich entwickelt hat, mag es noch so etwas wie einen fortschreitenden Fluss der Zeit geben; deswegen ist es erlaubt, an dem zeitvollen Begriff der "Raum-Zeit" fest zu halten. Aber im Ganzen gesehen, also global, muss man, nach Gödel, das altehrwürdige Konzept der aus einer Vergangenheit, einer schwer greifbaren Gegenwart, und einer Zukunft bestehenden Zeit aufgeben.

Das Auslöschen der Zeit mag absurd erscheinen, weil sie doch so alltäglich ist. Allerdings ist das, was wir gewöhnlich als Zeit bezeichnen, konstruiert und basiert nicht direkt auf Beobachtungen. Bei unserer Geburt wissen wir nicht, dass auf den ersten Tag noch ein

zweiter folgt. Wir beobachten zunächst einzelne Ereignisse. Erfahrung zeigt uns, dass in deren Gesamtheit ein System liegt, das wir zeitlich anordnen können. Manche Ereignisse können leichter beeinflusst werden als andere, was zur wesentlichen Unterscheidung von Vergangenheit und Zukunft führt. Dieser Unterschied ist aber nur scheinbar, wie von Gödels Beispiel gezeigt. Wenn die Zeit sich in einen Kreis schließt, kann selbst ein Ereignis, das man lokal als vergangen ansieht, noch beeinflusst werden. Wir müssen nur länger warten, als wir es in unseren natürlich begrenzten historischen und Lebenszeiten gewohnt sind.

Statt separater Vergangenheit und Zukunft haben wir ein einzelnes Objekt. Vergangenheit und Zukunft sind wie die Wurzeln und die Zweige eines Baumes. Ohne Wurzeln können keine Zweige sein, und ohne Zweige keine Wurzeln. Und die Richtung, mit der der Baum “nach oben” wächst, ist nur kontingent durch die über den Tag gemittelte Position der solaren Lichtquelle bestimmt, aber nicht fundamental.

Der ganze Baum, zurück auf die Zeit übertragen, wird in der Relativitätstheorie als Weltlinie bezeichnet, als Ansammlung aller von einem idealisiert als ewig angenommenen Beobachter direkt greifbaren Ereignisse. Eine Weltlinie mag unendlich ausgezogen sein, wie im herkömmlichen Bild der Zeit, oder wie bei Gödel in einen Kreis geschlossen. Wenn der globale Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft erlöscht, so kann man fundamentale Existenz nur einer ganzen Weltlinie zuordnen, ohne ihre Bestandteile wesentlich zu unterscheiden. Die Synthese eines zeitlichen Ganzen ist auch von Ricarda Huch beschrieben worden [2]: “Wenn man aber die Dichtungen aller Völker und Zeiten durchgeht, so fragt man sich zaghaft, ob denn das Ungeheure möglich sei, daß zwei Dinge, die sich auszuschließen scheinen, von denen das Entstehen des einen durch das Auslösen des anderen bedingt ist, verschmolzen werden.” Gödel zwingt uns, dieses Ungeheure auch in der Zeit selbst zu sehen.

Aber warum nehmen wir dann das Geschehen ganz anders wahr, nicht als gesamte Weltlinie, sondern als sich in der Zeit abspielenden Vorgang? Wenn wir die Zeit mit dem Raum vergleichen, verliert die Weltlinie vielleicht etwas von ihrem Ungeheuren. Wir sind es vom Alltäglichen gewohnt, dass wir manche räumliche Objekte nicht ganz um- oder durchschauen können, weil sie undurchsichtig sind und viel in ihrem Inneren verbergen können. Ein zeitnahes Beispiel ist der Grund einer archäologischen Grabung, die in ihrer räumlichen Tätigkeit die Zeit erschließt. Eine tiefe Analyse zwingt uns, ein undurchsichtiges Objekt Schicht um Schicht abzutragen, um dann mental das erreichte Wissen zu einem Gesamtbild zusammen zu setzen.

Wir verstehen die räumliche Seite dieses Problems leicht, weil wir unsere Augen und das Licht gut kennen. Ebenso sind wir mit dem Tast- und Hörsinn gut vertraut, die manchmal der Raumerschließung dienen. Der Zeitsinn, wenn es ihn gibt — nicht nur als biologische Uhr, deren Wirken ja schon die lineare Zeit voraussetzt —, liegt aber tiefer und ist noch nicht auf ein grundlegendes physikalisches Phänomen zurück geführt, wie das Licht für den Sehsinn, den Schall für den Hörsinn, oder direkte Berührung, also materielle Kräfte, für den Tastsinn. Stattdessen gehen wir bei der Zeit umgekehrt vor: Wir nehmen das von uns Wahrgenommene als fundamental an und bauen es mathematisch in unsere physikalischen Theorien ein.

Die Weltlinie, von der eine archäologische Grabung oder unsere persönliche Lebenszeit nur einen kleinen Ausschnitt zeigen, ist ungeheuer vielschichtig. Mit der Zeitwahrnehmung, die uns gegeben ist, müssen wir uns mühevoll, Sekunde um Sekunde, vorarbeiten. Wir haben schlicht keinen Sinn für das Ganze. Auf die Zeit übertragen, sehen wir nicht den Grund der Grabung als einzelnes Objekt. Wir sehen nur einzelne Schichten, die wir unvollkommen für kurze Zeit im Gedächtnis tragen oder in diversen Medien festzuhalten suchen. Dies ist eine Aussage über unsere Sinne, nicht über das Wesen der Zeit.

Die Gödelsche Raum-Zeit und sein ungeheurer Schluss sind historisch wenig beachtet oder allenfalls als Kuriosität abgetan worden, abgesehen vielleicht von Anhängern des Blockuniversums, die ähnliche Ideen entwickelt haben. Die meisten Physiker und Philosophen haben sich dem Schluss der Nichtexistenz der Zeit widersetzt. Warum sollten wir auch unser allgemeines Konzept der Zeit eliminieren, nur wenn es in einigen, aber bei Weitem nicht allen Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht realisiert werden kann? Ebenso gibt es mathematische Lösungen, nach denen das Universum zu früh kollabieren würde, um Sterne oder Galaxien entstehen zu lassen. Sollen wir deshalb schließen, dass es weder Sterne noch Galaxien gibt, und damit auch nicht uns selbst, die wir auf einen gewissen Stern angewiesen sind?

Es ist die Rolle der Zeit als fundamentalem Objekt, die diesen Ausweg nicht erlaubt. Sterne und Galaxien sind kontingent, es muss sie also nicht in jeder Raum-Zeit geben. Sie entsprechen in ihrer mathematischen Beschreibung Eigenschaften, die manchmal aber nicht immer realisiert sein mögen. Unsere Zeitvorstellung ist aber grundlegend für eine Interpretation dieser mathematischen Lösungen, ja der gesamten Theorie. Als solch fundamentales Objekt verliert die Zeit ihren Sinn, wenn sie nur in einem Teil aller mathematisch möglichen Raum-Zeiten konstruiert werden kann. Aus diesem Grund ergibt sich Gödels Nichtexistenz der Zeit. Was weiterhin besteht ist allenfalls die Illusion der Zeit.

3 Zeitillusion

Wegen ihres illusionären Charakters lässt sich die Zeit leicht missbrauchen. So legt zum Beispiel Michael de Carvajal, der im sechzehnten Jahrhundert die erste Anklage der spanischen Eroberung Mittelamerikas literarisch formuliert hatte, dem Augustinus die folgenden Worte in den Mund [3]:

Ora que hay tiempo y sazón
tené al tiempo por la frente
ya sabéis su condición
que es volar, y no es razón
que se os vaya eternamente.

(Auf deutsch etwa “Nun zur Reife der Zeit\ gedenke dessen, was kommt.\ Denn du kennst ihre Art\ zu fliegen, doch ohne Grund\ sollte sie ewig ziehn.”) Diese vertröstende Rolle der Zeit kommt auch in der Redensart “Die Zeit heilt alle Wunden” zum Ausdruck. In essenziellen Bereichen unseres Lebens, wie medizinischen Behandlungen und

der Verarbeitung traumatischer oder auch nur ärgerlicher Ereignisse, sind wir auf die Zeit angewiesen. Deren Nichtexistenz gleicht somit einem niederschlagenden Urteil. Hoffen und Heilen, Vergeben und Vergessen, nichts davon existiert, wenn es die Zeit nicht gibt.

Wenn es die Zeit nicht gibt, um unsere Wunden zu heilen, müssen wir es selbst unternehmen. Auf diese Weise führt Gödels Schluss zu einem positiven Weltbild, wenn wir ihn nur ganz verinnerlichen können. Er zwingt uns zu verantwortlichem Handeln, einem Handeln, das zwar wie jedes Handeln Zeit braucht, aber von ihrer Illusion unterrichtet ist. In Ludwig Tiecks Worten, “*Wir sind das Schicksal, das sie aufrecht hält!*”

Zur üblichen Vorstellung der Zeit werden wir durch die Beobachtung von Ereignissen geleitet, zwischen denen wir einen als kausal bezeichneten Zusammenhang erkennen. Diese Ereignisse und deren Zusammenhänge existieren weiterhin, wenn es die Zeit nicht gibt, denn sie sind das, was wir direkt beobachten. Ohne Zeit ist aber der Unterschied zwischen kausal zusammenhängenden Ereignissen aufgehoben. Ein jetziges Ereignis und ein dadurch bewirktes sind ein Einziges. Die Wunde existiert schon, wenn man zum Schlag ansetzt. Und als unauslöschbarer Teil der Weltlinie besteht sie weiter, wenn der Körper sie verschlossen hat. Wir sollten uns nicht auf die Zeit verlassen, um die Wunde zu heilen. Aber wir können sie vermeiden, und zwar durch verantwortungsvolles Handeln.

Leider sind wir nicht in der Lage, die gesamte Zeit und alle Auswirkungen unseres Handelns zu überblicken. Wie ein Nagetier die Wurzeln eines Baumes anknabbern mag, ohne den Schaden für die Zweige zu ahnen, so sind wir selten von langwierigen Auswirkungen unseres Tuns unterrichtet. Hier liegt die wichtige Rolle der Wissenschaften, die, auch wenn sie auf dem herkömmlichen Bild der Zeit basieren und die Vergangenheit erklären oder die Zukunft vorhersagen möchten, uns einen Blick auf eine über unsere persönliche Erfahrung erweiterte Weltlinie ermöglichen. Die Illusion der Zeit ist notwendig, um Wissenschaft zu entwickeln. Die Wissenschaften wirken dann wie eine zeitliche Weitwinkelkamera, die im Idealfall die Gänze der Zeit, das Panorama der Weltlinie, in unser Blickfeld rückt. Letztendlich sind es auch die Wissenschaften selbst, insbesondere die Physik, die uns, vermittelt durch Gödel, die Illusion der Zeit aufzeigen. Der endgültige Schluss führt zurück auf unser Handeln, unterrichtet durch die Wissenschaften und im Vertrauen auf sie.

Die Nichtexistenz der Zeit zwingt uns zum sofortigen Handeln, sobald wir ein Problem erkennen. Wie die Zeit keine körperlichen Wunden heilt, so ist sie auch nicht in der Lage, die Wunden der Erde zu heilen. Es ist wissenschaftlich erwiesen, wenn auch politisch nur ungenügend erkannt, dass wir jetzt handeln müssen, um Umweltzerstörung und Klimaänderung entgegenzuwirken. Bedrohliche Auswirkungen der Erderwärmung sind schon auf unserer Weltlinie, sie sind schon Wirklichkeit. Im persönlichen Bereich leitet uns die verantwortungsvolle Interpretation der Nichtexistenz der Zeit auch zu dem Entschluss, uns impfen zu lassen, oder zu gesunder Ernährung. Ob es diese Einsicht war, die Kurt Gödel in zu konsequenter Verfolgung und mit einer Zumischung von Paranoia zur Nahrungsverweigerung und schließlich in den Hungertod trieb — aus Angst, vergiftet zu werden — bleibt der Spekulation überlassen.

4 Zeitverwirrung

Verantwortungsvolles Handeln ist in seinem Ursprung ein zutiefst deterministischer Begriff. Um Verantwortung auszuüben oder uns ihrer bewusst zu sein, müssen wir davon ausgehen, dass jede Handlung eine eindeutige oder zumindest klar definierte Wirkung hat. Determinismus ist ein weiteres Beispiel einer anschaulichen Eigenschaft, die von der Quantenmechanik bedrohlich herausgefordert wird.

In unserer Quantenwelt können wir nicht sicher wissen, welchen Ausgang eine Entscheidung nimmt. Wir können höchstens Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Möglichkeiten formulieren. Auch wenn dieser Grundsatz für mikroskopische Objekte wie Elementarteilchen seine dramatischsten Auswirkungen zeigt, muss er auch in unserer alltäglichen Welt angewendet werden. Wie können wir dann verantwortungsvoll handeln, wenn es fast immer noch eine winzig kleine aber nicht verschwindende Wahrscheinlichkeit dafür gibt, dass das genaue Gegenteil des Beabsichtigten eintritt?

In letzter Konsequenz führt der probabilistische Charakter, auf die Zeit und das Handeln angewandt, zum endgültigen Ende der Zeit. Wenn immer auch das Gegenteil des Beabsichtigten eintreten könnte, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, so können wir keine Entscheidung mit vollständiger Sicherheit treffen. Die Nichtexistenz der Zeit im Gödelschen Sinne, zusammen mit dem Wunsch nach perfektem Handeln, führt dann zu kompletter Lähmung, oder der Abwesenheit jeden Handelns. Wenn wir uns diesem Schluss hingeben, verlieren wir nicht nur die Zeit, wir verlieren sogar die Illusion der Zeit, die unser Handeln ermöglicht. Wenn dies geschieht, dann gibt es nur noch Stillstand.

Glücklicherweise sind unsere derzeitigen Probleme aber groß genug, um ruhig über die Quantenmechanik hinwegsehen zu können. In den meisten Fällen bedingt eine Handlung ein festes Ergebnis mit überwältigender Wahrscheinlichkeit. Da wissenschaftliche Vorhersagen ja auch nie ganz sicher sind, weil sie auf notwendigerweise unvollständiger Datenaufnahme beruhen, findet ohnehin jede Entscheidung mit einem gewissen Zweifel statt. Die Quantenmechanik erteilt diesem Zweifel eine fundamentale, nicht eliminierbare Rolle. Im praktischen Leben spielt dieser Unterschied aber keine Rolle, und die verantwortungsvolle Interpretation der Zeit kann weiter bestehen.

Im mikroskopischen Bereich, wo Elementarteilchen die quantenmechanische Probabilistik nicht ignorieren können (und auch sonst nur schwer in der Lage wären, Entscheidungen zu treffen) erreicht die neue, auf Handeln basierende Interpretation der Zeit natürlich eine Grenze. Allerdings wissen wir nicht genau, wie die Zeit im mikroskopischen Bereich verläuft. Selbst die herkömmliche Zeit ist ja von uns konstruiert und mathematisch in die Theorien der Elementarteilchenphysik eingebaut worden. In erster Linie geht die Interpretation der von uns erdachten Zeit also nur uns selbst an, und wir sind durchaus in der Lage, verantwortlich Entscheidungen zu treffen. Dennoch ist es eine wichtige wissenschaftliche Frage, wie unsere alltägliche Zeit mit einer elementaren, quantenspringenden Teilchendynamik verträglich sein kann.

5 Zeitversuche

Um einen wissenschaftlichen Schluss als haltbar zu betrachten, muss man ein Experiment versuchen. Die Zeit erweist sich hier als ebenso unhandlich wie in einer spekulativen Betrachtung, die über das gewöhnliche Verständnis hinausgehen soll. Zwar ist die Zeitmessung schon seit Jahrhunderten erfolgreich angegangen worden, und ihre Genauigkeit wird weiterhin stetig erhöht, vor allem durch Atomuhren. Auch kann die relativistische Zeitdilatation experimentell bestätigt werden. Was sich aber als äußerst schwierig, ja fast unmöglich erweist, ist, das Wesen der Zeit experimentell zu testen.

In der modernen Physik untersucht man das Wesen eines Objektes oder Konzeptes, indem man versucht, es in Bestandteile aufzuspalten. So haben uns Hochenergieexperimente an Teilchenbeschleunigern zum Beispiel gezeigt, dass Protonen und Neutronen nicht fundamental sind, sondern aus Quarks und Gluonen gebaut. Elektronen konnten allerdings noch nicht zerschlagen werden, sie gelten also weiterhin als elementar.

Während dieses Vorgehen auf den ersten Blick der alten und rustikalen Hammermethode entsprechen mag, liefert es oft erstaunliche Einsichten, die wesentlich über eine detailliertere Beschreibung von schon Bekanntem hinausgehen. Ein Beispiel ist die Entdeckung, dass die Teilchenwelt durch neue Symmetrien gekennzeichnet ist, die ganz unterschiedliche Teilchen, wie Elektronen und Neutrinos, miteinander in Beziehung stellen.

Ein weiteres, jüngerer Beispiel ist der Nachweis des Higgsteilchens, das durch seine Wechselwirkung mit anderen Teilchen deren Masse bewirkt. Dieser zunächst unerwartete Mechanismus kann als Vorbild dessen dienen, wie wir vielleicht einmal zu einem besseren, wissenschaftlicheren Verständnis der Zeit vordringen könnten: Ein so alltäglicher Begriff wie die Masse eines Objektes, das schwer und deutlich in unserer Hand liegt, wird fundamental dadurch erklärt, dass die es zusammensetzenden Elementarteilchen auf verschiedene Weise und äußerst dynamisch mit dem Higgsteilchen zusammenstoßen.

Vielleicht werden wir ja auch einmal zu einer vergleichbaren Einsicht über die Zeit geleitet. Um dies zu erreichen, ist vor allem eine starke Basis von theoretischer Physik nötig, die, ähnlich wie die ursprüngliche Arbeit von Peter Higgs und anderen [4, 5, 6], einen möglichen experimentellen Weg weist. Die Zeit ist aber so fundamental, dass ihre theoretische Behandlung all das benötigt, was wir bisher verstanden haben, also nicht nur die Quantenmechanik, sondern auch und vor allem die Allgemeine Relativitätstheorie.

Leider sind diese beiden Theorien, die weitgehend unabhängig voneinander entwickelt wurden, nur schwer vereinbar. Und, wie schon gesehen, kommen selbst diese elementaren Theorien nicht ohne gewisse angenommene Eigenschaften der Zeit aus, die uns als vernünftig erscheinen mögen, aber deswegen noch lange nicht korrekt sein müssen. An einer möglichen Vereinigung beider Theorien, einer sogenannten Quantengravitation, ist schon seit Jahrzehnten geforscht worden, leider nur mit relativ bescheidenem Erfolg. Ohne verlässliche Quantengravitation ist es auch sehr schwierig, ausführbare Zeitversuche zu entwickeln.

Die Schwierigkeit dieses Unterfangens wird auch durch einige Zahlenwerte verdeutlicht. Als fundamentale Größe der Zeit wird oft die Planckzeit angeführt, die von Max Planck durch ein beliebtes Zahlenexperiment gefunden wurde [7]. In der modernen Physik gibt es

eine Anzahl von Naturkonstanten, wie die Lichtgeschwindigkeit oder die Newtonsche und die Plancksche Konstante. Diese Konstanten werden als zeitlich unveränderlich angesehen, wie sie sich auch bisher in allen Experimenten erwiesen haben. Sie sind, in gewissem Sinne, fundamentaler als die Zeit, weil die Zeit zur Beschreibung einer Konstanten nicht notwendig ist. Wie Planck bemerkte, können diese Konstanten auf eindeutige Weise so miteinander multipliziert oder dividiert werden, dass als Ergebnis eine Zeiteinheit herauskommt, eben die Planckzeit.

Da die Werte der Lichtgeschwindigkeit sowie die von Newtons und Plancks Konstanten bekannt sind, kann man die Planckzeit berechnen. Sie ist unvorstellbar kurz. Eine Pikosekunde ist ein Billionstel einer Sekunde, was schon ziemlich wenig Zeit ist. Aber eine Pikosekunde enthält etwa so viele Planckzeiten, wie das derzeitige Alter des Universums seit dem Urknall Pikosekunden enthält. In anderen, aber wohl auch wenig anschaulichen Worten gleicht die Planckzeit vierundfünfzig Quattuordezillionsteln einer Sekunde. Zwar können moderne Atomuhren und andere Experimente weit geringere Zeiten als eine Pikosekunde messen — die zurzeit genaueste Zeitmessung liegt im Bereich der Zeptosekunde, oder einem Millardstel einer Pikosekunde [8] — aber eine direkte Messung der Planckzeit scheint doch in hoffnungslos weiter Ferne.

6 Zeitwende

Wie hinterfragt man das Wesen von etwas so Elementarem wie der Zeit, einem Konzept, das dem Prozess des Hinterfragens selbst zu Grunde zu liegen scheint? Die Winzigkeit der Planckzeit, zu der man vielleicht wesentliche physikalische Erscheinungen erwartet, erfüllt dieses Unterfangen keineswegs mit mehr Hoffnung. Allerdings hatte ja auch zu Plancks Zeit (im historischen Sinne, als er nämlich auf die Planckzeit stieß) niemand erwartet, dass aus seinen anderen Aktivitäten, die schließlich die Quantenmechanik entzünden sollten, tiefe Einsichten in die Struktur der Materie und, über das Higgsteilchen, selbst des Wesens der Masse errungen werden könnten.

Gödels Unzeit, also sein Schluss über die Nichtexistenz der Zeit, ist in gewissem Sinne mit Plancks Untersuchung der Wärmestrahlung vergleichbar. In beiden Fällen steht zunächst ein konzeptionelles Problem im Vordergrund, bei Gödel eben die Zeit und bei Planck die Endlichkeit der Energie von Wärme in einem Hohlraum. Beide Theoretiker benutzten etablierte klassische Theorien, um letztendlich über diese hinauszudeuten. Plancks Einsicht führte über Albert Einstein, Niels Bohr und andere zur Quantenmechanik, die die Newtonsche Mechanik als fundamentale Theorie ersetzt. Gödels Schluss unterhöhlt das in der Allgemeinen Relativitätstheorie angenommene Zeitbild. In diesem Fall sind wir aber noch weit von einer noch allgemeineren Theorie entfernt, die die Zeit fundamental erklären könnte. Es war schwierig genug, uns von Newtonschen Idealen wie dem Determinismus oder einer im Prinzip beliebig genauen Messschärfe zu trennen. Wie können wir eine Theorie der Zeit formulieren und durch Experimente testen, ohne schon von grundlegenden aber vielleicht fehlleitenden Eigenschaften der Zeit auszugehen?

Schon bevor die Quantenmechanik rigoros als mathematisch-physikalische Theorie for-

muliert wurde, vor allem durch Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, und Paul Dirac, war es Niels Bohr gelungen, die entscheidenden Eigenschaften in seinem Atommodell darzulegen [9]. An Details dieses Modells mussten später noch Korrekturen vorgenommen werden, aber grundlegende Beiträge wie die gequantelten Elektronenbahnen oder Orbitale blieben nicht nur erhalten, sie waren auch entscheidend für ein konzeptionelles Verständnis der neuen Theorie. Ein bedeutender Schritt in unserem Zeitverständnis wäre der von Gödels Analog der Planckschen Untersuchungen hin zu einem mit dem Bohrschen Atom vergleichbaren Modell der Zeit, das auf physikalischen Prozessen basiert.

Bohr hatte sein Modell nicht frei erfunden. Er war von einem reichhaltigen Datenschatz der Spektroskopie geleitet worden, insbesondere des atomaren Wasserstoffs. Für die Zeit haben wir noch keine vergleichbaren Daten, oder, falls sie existieren, haben wir sie noch nicht mit der grundlegenden Zeit in Zusammenhang gebracht. Man könnte sich vorstellen, dass geeignete Daten vielleicht in der Verteilung der Zeitmesswerte von Atomuhren liegen. Atomuhren sind zwar sehr genau, aber, wie alles andere, von einer gewissen Unschärfe behaftet. Die Quantenmechanik spielt wie immer bei Unschärfe eine Rolle, aber auch die Tatsache, dass das Ablesen von Messinstrumenten nicht nur auf das eigentlich interessierende Objekt reagiert, sondern auch auf äußerliche Einflüsse wie leichte Temperaturschwankungen.

Wenn die Zeit nicht fundamental ist, sondern konstruiert und auf noch grundlegenden physikalischen Prozessen beruhend, so kann sie nicht so glatt und strukturlos ablaufen, wie wir uns das weithin vorstellen. Sie würde eine neue Art von Zeitunschärfe ergeben, die wir von der schon bekannten trennen müssten. Für eine Trennung brauchen wir aber eine Beschreibung, oder eine Theorie des Zeitmodells. Wir haben uns also im Kreis gedreht: Wir benötigen Messresultate, um ein Modell zu entwickeln, brauchen aber ein Modell, um geeignete Messresultate zu identifizieren.

Wenn wir keinen bestimmten Ansatz haben, um der Zeit auf den Grund zu gehen, sollten wir mit weitem Blick auf all die Phänomene schauen, die wir schon erkundet haben. Ähnlich sind ja auch die tiefen Einsichten, die Gödel zu unserer Erkenntnis beigetragen hat, nicht nur im Zusammenhang der Zeit, von großer Allgemeinheit geprägt. Alles, was mit der Zeit zusammenhängt, kann uns bei ihrem tieferen Verständnis helfen.

Eine überraschende und letztendlich auch unverstandene, aber eindeutig durch Experimente gezeigte Eigenschaft der Zeit ist eine eigenartige Unsymmetrie. Wir wissen, dass die Vergangenheit sich wesentlich von der Zukunft unterscheidet, nehmen aber üblicherweise an, dass die Richtung von jener zu dieser zufällig in unserem Universum so gesetzt ist, wie wir sie nun einmal vorfinden. Wir können uns vorstellen, dass wir genau so gut in einem Universum hätten aufwachsen können, in dem die Richtung umgekehrt ist. Das Universum würde dann zwar schrumpfen anstatt sich auszudehnen, aber im täglichen Leben und selbst in empfindlichen irdischen Experimenten der Physik sollte das wenig Auswirkungen haben, so jedenfalls eine weitläufige Annahme.

Diese Annahme hat sich aber als falsch herausgestellt. Die Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen hängen davon ab, ob die Zeit vorwärts läuft, also so, wie wir sie auch wirklich wahrnehmen, oder rückwärts [10]. Wir können messen, welche an unsere Gegenwart angrenzende zeitliche Seite die Vergangenheit zu sein hat, und welche die Zukunft.

Diese Einsicht könnte ein entscheidender, aber noch wenig erforschter Beitrag zu einem tieferen Verständnis der Zeit sein.

Auch wenn wir die Zeit meist als linear und monoton wachsend ansehen, ist sie nämlich eher an rotierenden, schwingenden oder oszillierenden Phänomenen orientiert. Alltägliche zeitliche Erscheinungen wie der Tagesverlauf oder die Jahreszeiten sind durch die Rotation der Erde oder ihren Lauf um die Sonne bedingt. Alte wie neue Zeitmessungen basieren auf Oszillation, wie die eines Pendels, des Quarzkristalls, oder einer bestimmten elektromagnetischen Schwingung in Wechselwirkung mit dem Cäsiumatom, das in modernen Atomuhren ausgenutzt wird. Selbst der monoton fallende Inhalt einer Sanduhr muss durch deren Umdrehen periodisch neu gestartet werden, um längere Zeiträume zu überblicken.

Es liegt also nahe, auch die fundamentale Zeit als eine Schwingung im All anzusetzen. Deren Periode könnte die winzige Planckzeit sein, so dass wir eine einzige Schwingung nicht wahrnehmen würden, der gesamte Ablauf aber dennoch zur zeitlichen Orientierung aller Vorgänge dienen könnte. In der theoretischen Physik würde man diese Allschwingung als ein neues, noch zu entdeckendes Elementarteilchen beschreiben — ein Uhrmacherteilchen oder vielleicht Chronon. Elementarteilchen sind ja letztendlich auch Schwingungen einer quantenmechanischen Wellenfunktion, die üblicherweise aber nicht die Zeit liefern, weil sie als in einer schon vorhandenen Zeit gedacht werden. Die fundamentalste dieser Schwingungen, also die mit der kürzesten, Plancknahen Periode, könnte trotzdem als Uhr formuliert werden und so den Takt aller anderen Schwingungen dirigieren.

Die Grundidee dieser Überlegung war schon von Paul Dirac vorgeschlagen worden [11], einem der großen Entwickler der Quantenmechanik, der sich auch um ein Näherbringen der Allgemeinen Relativitätstheorie an das Quantenhafte verdient gemacht hat. Allerdings leidet sie von allerlei Schwierigkeiten, die noch immer in ihrer mathematischen Formulierung stecken. In den letzten Jahren ist immerhin etwas Fortschritt gelungen, teils durch Heranziehen von Methoden der Quanteninformation, die ursprünglich für ein Verständnis von Quantencomputern entwickelt wurden.

Wir sind nun in der Lage, unsere zwei fundamentalen Einsichten zu vereinen, die beobachtete Zeitunsymmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft, sowie die Notwendigkeit einer Allschwingung als physikalischem Taktgeber im Universum. Als Schwingung läuft letztere nicht monoton voran, sondern wechselt zwischen Vorwärts und Rückwärts hin und her. Wegen der Zeitunsymmetrie würden sich verschiedene Prozesse der Elementarteilchen leicht unterschiedlich entwickeln, abhängig davon, ob sie im Vorwärts- oder im Rückwärtszyklus der Allschwingung stattfinden. Diese Unterschiede hätten Auswirkungen auf das über mehrere Allschwingungen stattfindende Verhalten, nach denen man in geeigneten Experimenten suchen sollte.

Bisher ist noch keine Theorie der Allschwingung und deren Auswirkungen auf Elementarteilchen formuliert worden, und selbst der hier unterbreitete Vorschlag ist neu. Er zeigt aber, dass wir durchaus in der Lage sind, den fundamentalen Charakter der Zeit zu testen. Ein Nachweis der Allschwingung oder eines ähnlichen fundamentalen Mechanismus für die Zeit würde zeigen, dass unser grundlegendes Zeitverständnis tatsächlich nur konstruiert ist. Es würde einen experimentellen Test von Gödels kühnem Schluss sein, dass die Zeit als fundamentale Erscheinung gar nicht existiert. Fundamentale Existenz hätten

nur die Allschwingung und die von ihr erfüllten Weltlinien, in denen wir uns mit unserer hochentwickelten aber letztendlich illusionären Zeitwahrnehmung wiederfinden.

Literaturhinweise

- [1] Gödel, K., An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation, *Reviews of Modern Physics* 21 (1949) 447.
- [2] Huch, R., *Die Romantik: Blütezeit, Ausbreitung, Verfall*, Rainer Wunderlich Verlag, Tübingen, 1951.
- [3] Jáuregui, C. A., *The conquest on trial, Carvajal's Complaint of the Indians in the Court of Death*, The Pennsylvania State University Press, University Park, PA, USA, 2008.
- [4] Englert, F. und Brout, R., Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons, *Physical Review Letters* 13 (1964) 321.
- [5] Higgs, P., Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons, *Physical Review Letters* 13 (1964) 508.
- [6] Guralnik, G.; Hagen, C. R. und Kibble, T. W. B., Global Conservation Laws and Massless Particles, *Physical Review Letters* 13 (1964) 585.
- [7] Planck M., Über irreversibele Strahlungsvorgänge V. (Schluss), *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Erster Halbband Januar bis Juni (1899) 440.
- [8] Grundmann, S. *et al.*, Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization, *Science* 370 (2020) 339.
- [9] Bohr, N., On the constitution of atoms and molecules, Part I, *Philosophical Magazine* 26 (1913) 1.
- [10] Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L. und Turlay, R., Evidence for the 2π Decay of the K_0^2 Meson System, *Physical Review Letters* 13 (1964) 138.
- [11] Dirac, P. A. M., Generalized Hamiltonian dynamics, *Canadian Journal of Mathematics* 2 (1950) 129.