

Zeit und Raum¹

Udo Strohbusch

1. Wie die Zeit vergeht

Wir erleben die Zeit in den Veränderungen, die wir in unserer Umgebung beobachten und auch an und in uns verspüren. Sie vergeht und fließt offensichtlich immer nur in einer Richtung dahin. Was noch Zukunft ist, wird zur Vergangenheit, die in unserem Gedächtnis weiterlebt. Ein höchst subjektiver Prozess dieses Übergang von noch nicht Existierendem in Vergangenes getrennt durch eine kurze Gegenwart, deren Dauer wir individuell je nach Erlebnissituation unterschiedlich empfinden und durchleben.

Zeit ist für den Menschen schwer zu verstehen. Aber wir können sie messen. Genauer gesagt: wir können den Lauf der Zeit objektiv verfolgen und Zeitintervalle sehr genau vermessen. Dazu dienen Uhren. Ihr wandernder Zeiger ist ein treues Spiegelbild der fortschreitenden Zeit. Unbestechlich nennen uns die Uhren eine objektive physikalische Zeit, wie sie zur Einordnung und Koordination verschiedenster Ereignisse unseres Lebens und zur Beschreibung von Naturgesetzen benötigt wird. Die damit erzielten großen Erfolge haben umgekehrt unsere Vorstellung von der Zeit wesentlich mitgeprägt, aber auch Vorurteile über ihre Allgültigkeit verfestigt, die sich als falsch erweisen sollten.

Im Folgenden gebe ich zunächst einen kurzen Überblick über die Entwicklung der Uhr und ihrer Messgenauigkeit (Kap. 2). Ein historischer Rückblick, der in NEWTONS berühmten und viel zitierten Satz von der absoluten Zeit mündet, schließt sich an (Kap. 3). Der „Sturz der absoluten Zeit“ begann erst 200 Jahre danach mit der Entdeckung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Sie ist der deutliche Fingerzeig, den uns die Natur gibt, dass etwas mit der herkömmlichen Vorstellung von der absoluten Zeit nicht stimmen kann. EINSTEIN hat das mit seiner Relativitätstheorie auch so interpretiert und die Erfolge geben ihm Recht (Kap. 4). Die spektakulärste Konsequenz ist der Einfluss, den Bewegung und Gravitation auf den Lauf der Zeit nehmen, und die daraus resultierende prinzipielle Möglichkeit von Zeitreisen (Kap. 5).

Als größte Überraschung der Kosmologie des zwanzigsten Jahrhunderts gilt die Entdeckung der ständig wachsenden Ausdehnung des Universums. Dreht man den Film der Expansion zurück, gelangt man zu einem Punkt der Zeit und des Raums, wo nach der Vorstellung der meisten Wissenschaftler alles in einer unvorstellbaren Explosion seinen Anfang nahm (Kap. 6).

Die Relativitätstheorie und die bahnbrechenden Erfolge der Kosmologie griffen nicht nur in althergebrachte Vorstellungen von der Zeit ein, sondern zwangen die Physiker auch, den Raumbegriff zu überdenken. Sie haben aber insbesondere dem Begriff der Zeit nichts von dem ihm anhaftenden Geheimnisvollen nehmen können (Kap. 7).

¹ Vortrag vom 25. September 2010 in der Reihe „Großbothener Gespräche“.

2. Von der Sonnenuhr zur Atomuhr

Der Schatten eines in den Boden gesteckten Stabes ist der Zeiger der ältesten Uhr. Er markiert den Stand der Sonne am Himmel bzw. den der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne und bei ihrer Rotation um ihre Nord-Süd-Achse. Um vom Sonnenschein unabhängig zu sein, nutzte man außerdem kontinuierlich verlaufende Prozesse. Hier ist die Menge des durch enge Öffnungen strömenden Wassers oder Sandes ein gutes Maß für die „fließende“ Zeit.

Periodische Vorgänge wie das Schwingen des Pendels lernte man erst viel später zur Zeitmessung anzuwenden. Ein trickreicher Mechanismus zur Hemmung der Drehung eines Rads im Takt des Pendels war die Grundlage der ersten Pendeluhr mit mechanischem Räderwerk, die 1673 von Christian HUYGENS konstruiert wurde. Zeitgenossen sahen kurioserweise im „Zerhacken der Zeit“ durch diese Erfindung einen abscheulichen Eingriff in den ruhigen Fluss der Zeit. Immerhin verbesserte dieses Sakrileg mit einem Schlag die Genauigkeit der Zeitmessung von 15 Minuten pro Tag bei den Wasseruhren auf wenige Sekunden (Abb. 1).

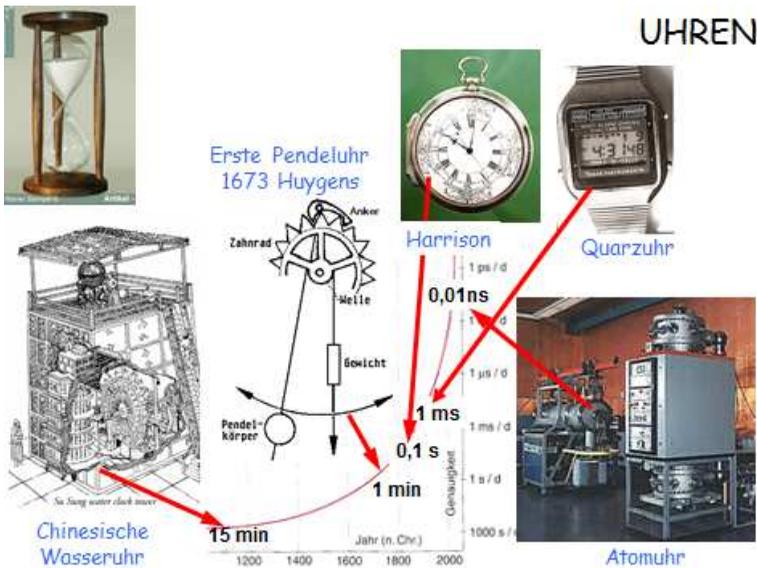


Abb. 1. Entwicklung der Ganggenauigkeit der Uhr in 1000 Jahren (Die Zahlenangaben an den Pfeilspitzen sind Fehlermargen pro Tag).

Die Präzision der Zeitmessung steigt mit jeder Idee der Uhrmacher ein Stückchen weiter an. Sicher ist es der Ehrgeiz des Erfinders, der einmal Begonnenes zur immer höheren Qualität treiben lässt. Es waren aber auch wachsende Forderungen an die Genauigkeit der Zeitmessung. Im Jahr 1765 bekam der Tüftler

John HARRISON für sein Chronometer Nr. 4 den sehr hohen Preis zugesprochen, den die britische Regierung 1714 für die Entwicklung eines präzisen seetüchtigen Chronometers zur genaueren Bestimmung von Schiffspositionen ausgelobt hatte. Es hat 50 Jahre gedauert, bis der geforderte Genauigkeitsgrad von weniger als einer Sekunde pro Tag an Bord eines Schiffs erreicht werden konnte.

Ein neues Uhren-Zeitalter leitet die Entwicklung der Elektrotechnik ein; sie ermöglicht wachsende Schwingfrequenzen und damit eine immer feinere Zeiteinteilung. Schwingt die Unruh mechanischer Präzisionsuhren etwa 10mal in der Sekunde, erreicht der Piezo-Kristall in Quarzuhren eine Frequenz von über 30.000 pro Sekunde mit entsprechend erhöhter Genauigkeit, die den Bruchteil von Millisekunden erreicht. Mit Hilfe so präziser Uhren gelangen überraschende Beobachtungen z.B. die, dass die Erdrotation gar nicht die Gleichmäßigkeit besitzt, die man ihr zugeschrieben hatte. Veränderung des Drehmoments der Erde auf Grund der Gezeiten oder langfristiger Verformungen der Oberfläche oder Umlagerungen im Erdkern sind die Ursache für die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit des Erdballs (Im Zeitalter der Dinosaurier rotierte die Erde schneller als heute) [1]. Die Effekte sind, aufs Jahr bezogen, sehr klein, aber sie gaben Anlass, über eine neue Definition unserer Zeiteinheit, der Sekunde, nachzudenken.

Noch schnellere periodische Vorgänge als in Schwingquarzen finden im Innern von Molekülen und Atomen statt. Atomuhren, die in ihrer heutigen Form mit Cäsium als Zentralatom im Jahr 1955 erstmalig gebaut wurden, haben inzwischen eine Ganggenauigkeit von drei Milliardstel Sekunden pro Tag. Diese immense Genauigkeit lässt sich vielleicht erst begreifen, wenn man bedenkt, dass das schnellste aller Signale, ein Lichtblitz, von den dreihunderttausend Kilometern, die es in einer Sekunde zurücklegt, in drei Milliardstel Sekunden lediglich einen Meter überstreicht. Andererseits bedeutet das, dass Atomuhren unerlässlich sind, will man Ortsbestimmungen mit der Genauigkeit von einigen Metern über Zeitmessung an Lichtsignalen vornehmen, wie es etwa im Navigationssystem GPS (Global Position System) geschieht.

Die Anforderungen an das GPS sind so hoch, dass bei der Zeitmessung ein uns hier vielleicht als verrückt erscheinendes Verhalten der Zeit berücksichtigt werden muss: sie vergeht in den großen Höhen der Sonden wegen der kleineren Gravitationskraft etwas schneller als auf dem Erdboden. Einen kleineren Effekt verursacht zusätzlich die Geschwindigkeit der Sonden: sie sorgt für eine minimale Verlangsamung des Zeitlaufs gegenüber erdbodenfesten Uhren. Diese relativistischen Effekte sind sehr klein; summa summarum schreitet durch sie die Zeit in den Sonden im konkreten Fall nur 40 Milliardstel Sekunden pro Tag schneller voran. Aber ohne entsprechende Korrektur würde die GPS-Navigation bald aus dem Ruder laufen.

Mit der Diskussion relativistischer Zeiteffekte im GPS habe ich dem übernächsten Kapitel etwas vorgegriffen und möchte jetzt erst einmal auf eine Zeit zurückblicken, die noch „in Ordnung“ war.

3. Als die Zeit noch in Ordnung war

Werfen wir also einen Blick weit zurück bis ins 17. Jahrhundert, gegen dessen Ende NEWTON sein Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, kurz „die Principia“ genannt, veröffentlichte. Dieses Werk gilt als eines der größten physikalischen und astronomischen Bücher aller Zeiten. Newton selbst bemerkte zu seiner Arbeit: „Wenn ich weiter sehen konnte, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stand.“ Diese Bescheidenheit kommt in einem Brief an Robert HOOKE, 5. Februar 1675/76, zum Ausdruck, entsprach aber durchaus nicht seiner sonstigen Art. Mit den „Riesen“ meinte er KOPERNIKUS (1473-1543), KEPLER (1571-1630) und GALILEI (1564-1642).

KOPERNIKUS hatte die Erde aus dem Zentrum der Welt entfernt und die Sonne an ihre Stelle gesetzt. KEPLER erkannte rund 70 Jahre später, dass die Planetenbahnen ellipsenförmig sind und dass zwischen der Entfernung der Planeten von der Sonne und ihren Umlaufzeiten ein einfacher, heute als „Keplersche Gesetze“ bekannter Zusammenhang besteht. Eine physikalische Erklärung für diese Gesetzmäßigkeit gab es allerdings lange nicht.

GALILEI hatte sich zunächst mit kinematischen Vorgängen auf der Erde befasst. Für die Untersuchung von Bewegungen wie die des Pendels oder fallender Körper benutzte er als Zeitmaß seinen Pulsschlag und später Wasseruhren. Aus den Resultaten seiner Experimente leitete er das Gesetz des Freien Falls ab. Eine Konsequenz, dass alle Körper (bei vernachlässigbarer Luft-Reibung) unabhängig von ihrem Gewicht gleich schnell fallen, sollte drei Jahrhunderte später (1921) der Ausgangspunkt für die Allgemeine Relativitätstheorie werden.

GALILEI war der erste Forscher, der ein Fernrohr für die Wissenschaft einsetzte und auf Himmelskörper richtete. Die Vielzahl von Entdeckungen, die er mit dem Fernrohr machte, war für ihn der Beweis der Richtigkeit des heliozentrischen Systems des KOPERNIKUS, für das er öffentlich eintrat und sich die Kritik des Heiligen Offizium zuzog.

NEWTON hat mit seiner in den „Principia“ veröffentlichten Theorie von der Schwerkraft gezeigt, dass die himmlische und die irdische Mechanik unter dem Regime derselben physikalischen Gesetze stehen – ein entscheidender Bruch mit den Ansichten der traditionellen auf ARISTOTELES zurückgehenden Lehre, wonach die Verhältnisse im Himmel grundlegend anderen Gesetzen unterliegen sollten als auf der Erde.

NEWTONS Theorie liefert die wissenschaftliche Erklärung für die KEPLER'schen Gesetze der Planetenbewegung ebenso wie für die von GALILEI empirisch gefunden Regeln des Freien Falls. Es ist dasselbe Gravitationsgesetz, das die Bahn der Erde um die 150 Millionen Kilometer entfernte Sonne regiert wie die Bewegung des Mondes um die Erde oder die Flugbahn des über den Bach geworfenen Steins.

Bei dem umfassenden Erfolg seiner Bewegungsgesetze und des Gravitationsgesetzes lag es für NEWTON nahe, sich Gedanken über eine ebenso umfassende Gültigkeit der Zeit und ihres Verlaufs und darüber hinaus auch über den Raum zu

machen. Alles Geschehen findet schließlich in Zeit und Raum statt. Der Lauf der Zeit, der in den Bewegungsgleichungen als Parameter enthalten ist, war für ihn selbstverständlich überall unveränderlich und unbeeinflussbar der gleiche. Ebenso gewiss war, dass es einen unveränderlichen Raum geben müsse, der in absoluter Ruhe gewissermaßen im Zentrum der Welt verankert – wo auch immer sich dieses befinden möge – a priori existiert.

Diesen besonderen Raum aufzuspüren, wurde zu einem großen Ziel der Physik über die folgenden zweihundert Jahre.

4. Sturz der absoluten Zeit

Im Laufe des neunzehnten Jahrhunderts, rund 200 Jahre nach dem Erscheinen von NEWTONS Principia, entwickelte sich mit der Erforschung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen ein völlig neues Gebiet der Physik. MAXWELL hatte um 1860 die experimentell gewonnenen Erkenntnisse seiner Zeit über elektrische und magnetische Phänomene in einem Satz mathematischer Gleichungen zusammengefasst. „Maxwells wunderbare Gleichungen“ stellten die Physik aber auch vor ein riesiges Problem: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts ist gemäß den Maxwellgleichungen eine Naturkonstante („c“), also unabhängig davon, wie schnell Quelle und Beobachter sich zueinander bewegen. Sie hat in allen gleichförmig zueinander bewegten Systemen denselben Wert von rund 300.000 Kilometern pro Sekunde². MICHELSON und MORLEY haben das in ihren berühmten Versuchen zum Nachweis des Licht-Äthers experimentell bestätigt gefunden - zu ihrem großen Leidwesen, denn sie hatten gehofft, durch den Nachweis einer Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Richtung zur Erdbewegung durch den „Ätherwind“ den Nachweis für die Existenz des Äthers erbringen zu können. Der Äther galt damals als das Medium, das vom Licht zu seiner Ausbreitung benötigt wird und gleichzeitig als Repräsentant des absolut ruhenden Raums.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, in zahlreichen Experimenten erwiesen, widerspricht der bisherigen Erfahrung mit Geschwindigkeiten.

Abb. 2 soll demonstrieren, was unsere „bisherige Erfahrung mit Geschwindigkeiten“ ist: Das Auto und die Straße in Abb. 2 sind zwei Systeme, auf die wir uns beziehen wollen. Im Auto ruht der Ballwerfer und auf der Straße der vom Ball getroffene Beobachter. Beide bewegen sich mit der Geschwindigkeit des Autos aufeinander zu. Für den Autofahrer hat der Ball die Geschwindigkeit, die er ihm beim Wurf gegeben hat. Für den Beobachter auf der Straße kommt aber noch die Geschwindigkeit des Autos hinzu (von dem Luftwiderstand wollen wir in diesem Gedankenexperiment absehen). Das ist der Inhalt des klassischen „Additionstheorems für Geschwindigkeiten“.

² Mit Lichtgeschwindigkeit ist hier immer die Geschwindigkeit im leeren Raum gemeint (Vakuumllichtgeschwindigkeit), welche genau $c = 299792,458$ Kilometer pro Sekunde beträgt. Nur für sie gilt das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, nicht für Lichtgeschwindigkeit in Stoffen.



Abb. 2. Klassische Geschwindigkeitsaddition.

Ersetzen wir nun den Ballwerfer durch eine Lichtquelle, die Bälle also durch die Lichtquanten (Photonen), die von der Quelle emittiert werden.

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit heißt dann aber, dass für die Geschwindigkeit der Photonen, die der Beobachter misst, die Autogeschwindigkeit überhaupt keine Rolle spielt. Wir können das Auto durch eine Rakete ersetzen, die jetzt nahezu mit Lichtgeschwindigkeit auf den Beobachter zufliegen soll. An der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts für den Beobachter ändert sich kein Deut. (vergessen Sie bitte die bedauernswerte Situation des Beobachters; hier geht es um die Erläuterung des Prinzips).

Es gab viele Versuche, die in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steckenden Widersprüche zu bekannten Physikprinzipien zu begreifen und zu beseitigen. Aber immer entstanden dabei neue Widersprüche.

EINSTEIN war der erste, der erkannte, dass man die Absolutheit der Zeit aufgeben musste, wollte man die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in das Gebäude der physikalischen Gesetze widerspruchsfrei aufnehmen. In simplen Worten: Wenn die Lichtgeschwindigkeit für den Beobachter nicht wächst mit der Geschwindigkeit, mit welcher Rakete und Lichtquelle auf den Beobachter zurasen, dann könnte das vielleicht daran liegen, dass die Zeit auf dem Auto bzw. der Rakete etwas langsamer läuft. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit war jedenfalls experimentell so gut wie bewiesen, wohingegen die absolute Unabhängigkeit der Zeit nur ein schönes Gedankenkonstrukt war, wenn auch die Überzahl der Wissenschaftler fest daran glaubte.

In seiner Speziellen Relativitätstheorie [2] beschränkte sich EINSTEIN auf Bezugssysteme (Auto und Straße im obigen Beispiel), die sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit zueinander bewegen. Man nennt solche Systeme Inertialsysteme. In ihnen wirken keine zusätzlichen Trägheitskräfte, wie sie etwa im Auto wirken würden, wenn dieses seine Geschwindigkeit ändert. Diese Beschränkung gelang es ihm zehn Jahre später in der Allgemeinen Relativitätstheorie aufzubrechen und die Gültigkeit der Theorie auf beschleunigt bewegte Systeme zu verallgemeinern. (Verglichen mit der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie war die Spezielle Relativitätstheorie „ein Kinderspiel“, sagt EINSTEIN).

EINSTEINS Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass große Massen wie die der Sonne Licht ablenken. Dadurch erscheinen Sterne, die von der Erde aus betrachtet nahe an der Sonne stehen, gegenüber ihrer eigentlichen Position verschoben. Nachdem es verschiedenen Gruppen gelungen war, das zu bestätigen,

wurde EINSTEIN vom geachteten Wissenschaftler unter Kollegen zum Wissenschafts-Popstar in der Öffentlichkeit. Am 10. November 1919 schreibt die New York Times: „Einsteins Theorie triumphiert. Die Lichter am Himmel sind alle schief, die Sterne sind nicht dort, wo man sie sieht, aber niemand muss sich darüber Sorgen machen“.

Heute sind die Effekte der Beeinflussung der Lichtausbreitung im Kosmos durch die ungeheuren Massen der Galaxien und Galaxienhaufen eine fast gewöhnliche Erscheinung in den Teleskopen der Astronomen (Abb. 3).

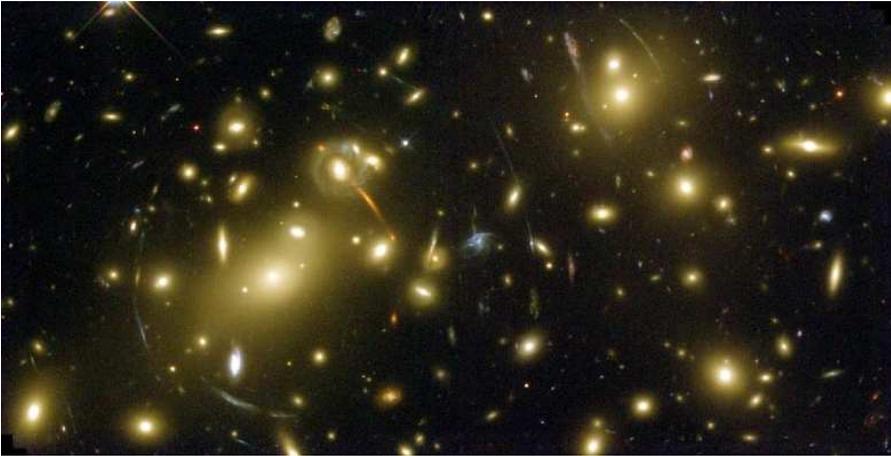


Abb. 3. Gravitationslinsen: Die Wirkung großer Massen auf den Weg des Lichts der Sterne. Die Bögen („Einsteinringe“) sind Abbild weit entfernter Leuchtobjekte hinter riesigen wie optische Linsen wirkenden Massenansammlungen.

Das Licht wird also vom Gravitationsfeld beeinflusst d. h. es zeigt Schwere. Bei hinreichend großer Massendichte kann die Gravitationskraft so groß sein, dass Licht von ihr eingefangen wird und nicht mehr enttrinnen kann. Ein so massereiches Objekt nennt man deswegen „Schwarzes Loch“. Schwarze Löcher sind unsichtbar, aber anhand der Bewegung der Sterne in der Reichweite ihres Gravitationsfeldes identifizierbar.

Die faszinierendste Konsequenz der Wechselwirkung Masse-Licht aber ist, dass dahinter letztlich eine Beeinflussung der Zeit steckt: Die Zeit verläuft in der Nähe großer Massen langsamer als weit weg davon.

Die Zeit ist keine absolut gültige Größe. Diese althergebrachte Vorstellung hat die Relativitätstheorie gründlich zerstört. Sowohl Bewegung wie auch Gravitation beeinflussen den Lauf der Zeit. Sie verlangsamen ihn, „dehnen“ also Zeitintervalle, bewirken eine „Zeitdilatation“. Kein seriöser Physiker bezweifelt die Richtigkeit dieser Konsequenzen der Relativitätstheorie. In vielen Disziplinen gehören die Allgemeine Relativitätstheorie und ihr Spezialfall, die Spezielle Relativitätstheorie zum täglichen Handwerkszeug. Viele ihrer Tests wurden erst Jahrzehnte nach Veröffentlichung der Relativitätstheorie durch die technologischen

Fortschritte ermöglicht. Jede Verbesserung in dieser Hinsicht brachte aber nur neue Bestätigungen der Theorie.

Im Folgenden will ich nur wenige quantitative Beispiele herausgreifen, die speziell mit dem Thema Zeit zu tun haben. Dabei wird evident, dass die Effekte unter „normalen Umständen“ sehr klein sind. Das hat mit der Größe der Lichtgeschwindigkeit gegenüber herkömmlichen Geschwindigkeiten von Bezugssystemen zu tun. Daraus ergibt sich auch, dass die klassischen Gesetze Newtons nicht einfach falsch sind, sondern für kleine Geschwindigkeiten und irdische Schwerkräfte sehr gute Näherungen darstellen.

5. Zeitdehnung und Reisen in die Zukunft

Das verlängerte Leben der Myonen

Eine eindrucksvolle Bestätigung der relativistischen Zeitdehnung durch Bewegung liefert der Zerfall schnell fliegender Elementarteilchen. Auf der Erdoberfläche sind wir einem ständigen Hagel von sehr durchdringenden (und deswegen harmlosen) Myonen ausgesetzt. Die Myonen entstehen in etwa 9 bis 12 Kilometer Höhe in großer Zahl unter dem Bombardement der Luft-Atome durch kosmische Teilchen sehr hoher Energie. Von dort starten sie ihren Flug mit nahezu Lichtgeschwindigkeit zur Erde. Myonen sind instabile Teilchen von sehr kurzer Lebensdauer. Wir können sie im Beschleuniger-Labor künstlich erzeugen und ihre Lebensdauer genau bestimmen. Von der Entstehung bis zum Zerfall in leichtere Teilchen vergehen im Durchschnitt zwei Millionstel Sekunden. Damit stehen wir aber vor einem großen Rätsel: Diese Lebenszeit ist für die Myonen entschieden zu kurz, um die Strecke bis zur Erdoberfläche „lebend“ zu überwinden; denn selbst bei höchstmöglicher Geschwindigkeit von 300.000 Kilometern in der Sekunde könnten sie in zwei Millionstel Sekunden nur 0,6 Kilometer zurücklegen.

Des Rätsels Lösung ist die zeitdehnende und damit lebensverlängernde Wirkung ihrer hohen Geschwindigkeit, die ihnen die Zeit verschafft, die Nachweisgeräte der Experimentatoren unversehrt zu erreichen. (Bei der Geschwindigkeit eines typischen Myons von $v = 99,8\%$ der Lichtgeschwindigkeit, $v/c=0,998$, verlängert sich die Lebensdauer um den Faktor 15 (s. Fußnote 3).

Experiment mit Atomuhren

Natürlich war der Wunsch groß, die Zeitdehnung nicht nur über veränderte Eigenschaften von Elementarteilchen nachzuweisen, sondern sie auch direkt mit Uhren zu registrieren. Im Oktober 1971 unternahm der Physiker HAFELE zusammen mit dem Astronomen KEATING und vier Atomuhren auf den Sitzplätzen eines Flugzeugs (Abb. 4) Rundreisen um die Erde und fanden nach Landung Zeitunterschiede zwischen ihren und den zurückgelassenen Atomuhren vor, die den vorhergesagten relativistischen Effekten entsprachen. Sie konnten sich glücklich schätzen, um rund 50 Milliardstel Sekunden weniger gealtert zu sein als das zurückgebliebene Bodenpersonal [3].



Abb. 4

J. HAFELE und R. KEATING zusammen mit der Atomuhr, die als „Mr. Clock“ auf zwei weiteren Sitzplätzen mitreiste. (Time Magazine, 18. Oktober 1971).

In einem Nachfolgeexperiment (1975 und 1976), dem „Maryland-Experiment“ [4] wurden mit weit höherer Präzision unter ständigem Uhrenvergleich durch Lasersynchronisation der Atomuhren und Laserimpulsübertragungen Zeitmessungen während mehrerer etwa 15-stündiger Flüge durchgeführt. Dadurch konnte man die wachsende Differenz in der Zeitanzeige der Uhren im Flugzeug und der am Boden stationierten Uhren ständig mitverfolgen. Das Maryland-Experiment konnte die von der Relativitätstheorie vorhergesagten Zeiteffekte (sowohl den Effekt der Bewegung als auch den von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Einfluss der Gravitation) auf besser als zwei Prozent nachweisen.

Reise in die Zukunft

Die Experimente lassen keinen Zweifel daran, dass Bewegung den Zeitablauf verlangsamt. Der Zeit-Effekt ist zwar selbst für höchste bisher praktikable Geschwindigkeiten winzig, aber er existiert und wächst mit der Geschwindigkeit an und zwar umso schneller, je näher wir der Lichtgeschwindigkeit kommen.

Wen also die 50 Milliardstel Sekunden Zeitgewinn der Herren HAFELE und KEATON nicht beeindruckt, der möge sich mit auf eine Phantasiereise begeben. Nehmen wir dazu einmal an, die Reisegeschwindigkeit v ließe sich auf 80 % der Lichtgeschwindigkeit c ($v/c = 0,8$) steigern. Der Alterungsprozess des Reisenden verlief dann nach den Formeln der Relativitätstheorie um den Faktor³ 1,67 langsamer. Nach 20 Erdenjahren Flugzeit beispielsweise wäre der Astronaut für den Beobachter auf der Erde um nur rund 12 Jahre gealtert. Nehmen wir weiter an, der Astronaut schaffte in kürzester Zeit die Umkehr und käme dann nach weiteren 20 Erdenjahren Flugzeit (derselben konstanten Geschwindigkeit $v/c = 0,8$) zurück, dann wäre er um weitere 12 Jahre also insgesamt um 24 Jahre älter geworden, während auf der Erde 40 Jahre verstrichen sind. Für den Astronauten war das also eine Reise um 16 Jahre in die Zukunft.

³ Der Zeitdehnungsfaktor ist: $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Solche Gedankenexperimente [5] wurden nach EINSTEINS Veröffentlichungen vielfach durchgespielt, ursprünglich in der Absicht, die Relativitätstheorie zu widerlegen. Heute zweifelt kein Experte mehr an der prinzipiellen Richtigkeit der Überlegungen, auch daran nicht, dass biologische Prozesse den Zeittransfer gleichermaßen erleben. Zu bezweifeln bleibt dagegen die Realisierbarkeit der hier angenommenen immensen Geschwindigkeit.

6. Der Urknall, Beginn von Zeit und Raum

Es ist nicht leicht, sich eine Vorstellung von der ungeheuren Größe des Weltalls zu machen. Die unbegreifliche Leere zwischen den Sternen wird in dem Beispiel des Astronomen James JEANS veranschaulicht: Legt man 3 Sandkörner in eine riesige Kathedrale, ist die Kathedrale dichter mit Sand gefüllt als der Weltraum mit Sternen. Beginnen wir aber zuerst einmal mit unserer näheren Umgebung.

Ein Blick in den klaren Nachthimmel zeigt uns den hellen Streifen der Milchstraße, unserer Heimatgalaxie. Aus unzähligen Beobachtungen der Astrophysik können wir heute schließen, dass unsere Galaxie eine spiralförmige Ansammlung von über 200 Milliarden Sternen ist. Die Sonne ist einer von ihnen. Die Abb. 5 zeigt oben die Queransicht unserer Milchstraße. Die Queransicht wurde mit dem Weltraumteleskop Hubble aufgenommen aus dem sternenumfüllten Diskus heraus, in dem wir uns befinden und von dem unser Sonnensystem selbst winziger Bestandteil ist. Der untere Teil des Bilds ist die Draufsicht auf eine unserer Milchstraße sehr ähnliche Spiralgalaxie des Kosmos. (Die direkte Sicht auf unsere Heimatgalaxie bleibt uns und unseren Raumsonden, die noch nicht einmal unser Sonnensystem verlassen konnten, bis auf weiteres verwehrt). Die Distanzen sind in Lichtjahren angegeben. Ein Lichtjahr ist der vom Licht in einem Jahr zurückgelegte Weg, bei 300.000 Kilometern in der Sekunde und den 30 Millionen Sekunden eines Jahres eine wahrhaft beachtliche Längeneinheit! Unser Nachbar, die Andromedagalaxie ist übrigens 2,5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.

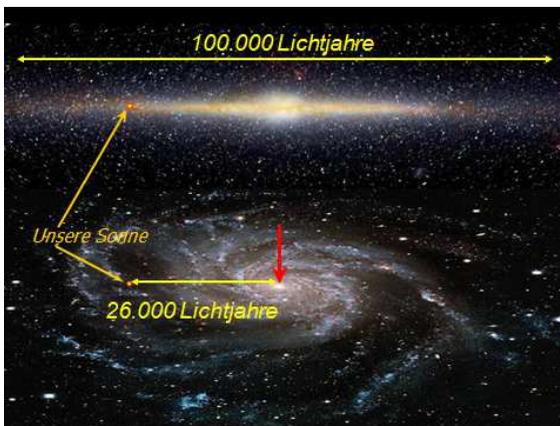


Abb. 5

Sonne in der Milchstraße. Das unsichtbare Schwarze Loch im Zentrum unserer Heimatgalaxie hat die 4millionenfache Masse unserer Sonne.

Die Galaxien sind Materieinseln im Weltall, die durch die Gravitationskraft im Innern zusammengehalten werden. Ihre Anzahl wird auf 200 bis 300 Milliarden geschätzt. Sie sind die eigentlichen Bausteine des Universums, zwischen denen allerdings riesige Leere gähnt.

Großes Geschick haben die Astronomen bei der Bestimmung kosmischer Distanzen entwickelt. Insbesondere bei größten Entfernungen kommen ihnen dabei Sternexplosionen zu Hilfe, deren Helligkeit nicht selten die Leuchtstärke ganzer Galaxien überstrahlt. Der Entwicklungsprozess solcher sog. Supernovae (vom Typ Ia) ist bekannt und infolgedessen auch die vor Ort entwickelte Leuchtstärke. Aus der tatsächlich beobachteten Helligkeit lässt sich hierdurch auf ihre Entfernung rückschließen. Mit modernen Teleskopen und speziellen Suchprogrammen werden jährlich mehrere Hundert Supernovae aufgespürt. So haben die Kosmologen im Laufe der Zeit einen Überblick nicht nur von der Verteilung der Galaxien über das Himmelsgewölbe, sondern auch von ihrer Entfernung von unserer Heimatgalaxie gewonnen.

Anfang des 20. Jahrhunderts machte Edwin HUBBLE bei der Analyse der optischen Spektren einzelner Galaxien eine überraschende Entdeckung. Er fand, dass die Spektren der weit entfernten Galaxien systematisch zu größeren Wellenlängen verschoben sind. Diese „Rotverschiebung“ der Spektren deutet auf eine Fluchtbewegung der Galaxien. HUBBLE konnte darüber hinaus feststellen, dass die Rotverschiebung umso stärker ist, je weiter die Galaxien von unserer Milchstraße schon entfernt sind. Das heißt, die Fluchtgeschwindigkeit wächst mit der Entfernung und zwar - wie HUBBLE schließlich noch entdeckte - proportional zur Entfernung. Dieser letzte Punkt ist ausschlaggebend für die Interpretation der Fluchtbewegung: Die Galaxien bewegen sich mit dem expandierenden Raum. Der Raum dehnt sich aus und trägt die Galaxien mit sich fort.

Ein anschauliches Bild davon zeigt Abb. 6. Der Raum ist hier durch die zweidimensionale Oberfläche eines Luftballons dargestellt. Die aufgemalten Galaxien entfernen sich voneinander, wenn der Luftballon aufgeblasen wird und zwar umso schneller, je weiter die Galaxien schon voneinander entfernt sind. Die Oberfläche des Ballons ist das zweidimensionale Analogon des dreidimensionalen Universums und das Volumen des Ballons das dreidimensionale Analogon der vierdimensionalen Raum-Zeit. Ein bisschen schwer vorstellbar oder gewöhnungsbedürftig das Ganze. Aber zweierlei wird durch das Bild sehr schön dargestellt: Unsere Heimatgalaxie ist nicht das Zentrum des Alls und dessen Zentrum ist auch nicht mehr Bestandteil des Universums.

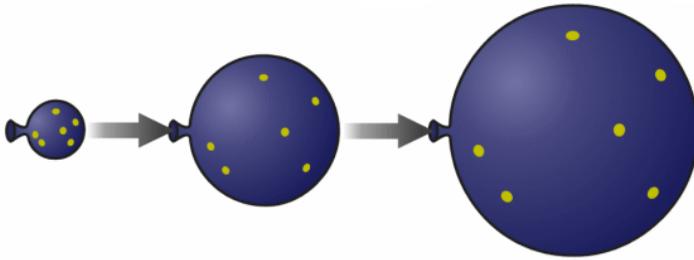


Abb. 6. Analogon der Expansion des Weltalls.

Das Bild von den allseits fliehenden Galaxien und des expandierenden Raums mit seinem Inhalt, den Galaxien, legt die Hypothese nahe, dass das Universum vor Urzeiten aus einem singulären Punkt extrem hoher Dichte und Energie hervorgegangen ist in Form einer Explosion des Raumes. Diesem Entstehungsprozess hat man den Namen „Urknall“ (Big Bang) gegeben. Zunächst war das spöttisch gemeint; denn es war die vorherrschende Auffassung, dass das Universum zu allen Zeiten gleich aussah („Steady State Universe“).

EINSTEIN, selbst Anhänger der Steady-State-Hypothese, mochte die Vorstellung, dass die Welt aus einem singulären, physikalisch nicht zu beschreibenden Punkt hervorgegangen ist, nicht akzeptieren. Er schrieb an LEMAITRE, einen der Väter der These vom Urknall: „Ihre Berechnungen sind richtig, aber ihre Physik ist scheußlich“. Einige Jahre später zollte er LEMAITRES Pionierarbeit anlässlich eines Seminars über HUBBLES Beobachtungen aber höheres Lob: „Dies ist die schönste und befriedigendste Erklärung der Schöpfung, die ich je gehört habe“.

Das Steady-State-Modell des Universums gilt heute als widerlegt. Dazu hat entscheidend die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch PENZIAS und WILSON 1964 beigetragen, einer Strahlung elektromagnetischer Mikrowellen, die in jedem Bereich des Himmels nachgewiesen werden kann und uns von allen Seiten wie ein Nachleuchten des Urknall-Feuerballs als „älteste Strahlung des Alls“ gleichmäßig umgibt. Im Radio kann sie als Rauschen wahrgenommen werden.

Nach der heute allgemein akzeptierten Urknallhypothese hatte das Universum also einen Beginn. Zeit und Raum nahmen ihren Anfang mit einer Explosion, für die allerdings jede Erklärung fehlt. Die Details des expandierenden Welt-raums und insbesondere auch die der kosmischen Hintergrundstrahlung gestatten inzwischen recht zuverlässig den Rückschluss, dass der Urknall sich vor 13,7 Milliarden Jahren ereignete. Unsere Welt setzt seitdem ihre Expansion unaufhörlich fort und das sogar mit wachsender Geschwindigkeit (Abb. 7). Was die Expansion zu dieser Beschleunigung antreibt, die „Dunkle Energie“ bleibt eines der größten Rätsel der Kosmologie.



Abb. 7. Ohne Kommentar.

Die Frage: „Was war vor dem Urknall?“ muss konsequenterweise mit „es gibt kein Davor“ beantwortet werden. „Einen Zeitpunkt, eine Sekunde vor dem Urknall hat es ebenso wenig gegeben wie eine Stelle einen Kilometer nördlich des Nordpols“ formuliert es Stephen HAWKING. Oder mit den Worten von Steven WEINBERG: „Wir müssen uns an die Vorstellung gewöhnen, dass es – wie es einen absoluten Nullpunkt der Temperatur gibt - einen absoluten Punkt der Zeit gibt – einen Augenblick in der Vergangenheit, über den hinaus es grundsätzlich unmöglich ist, die Kette von Ursache und Wirkung fortzusetzen“[6].

7. Die unverstandene Zeit

Wilhelm OSTWALD hat „Das Problem der Zeit“ zum Thema seines Festvortrags anlässlich der Eröffnung des Physikalisch-chemischen Instituts der Universität Leipzig 1898 gemacht [7] „Wir wissen, dass alles Geschehen zeitlich ist. Was ist nun mit diesem Worte gesagt?“ In seiner sich anschließenden auch heute noch sehr lesenswerten Analyse nennt er vier Elemente des Zeitbegriffs: Stetigkeit lineare Beschaffenheit, Eindeutigkeit und Einsinnigkeit.

Die Eigenschaft der Linearität („dass man von jedem bestimmten Werte nach einem anderen Werte nur auf eine Weise gelangen kann“) wird ebenso wie die Eindeutigkeit durch die Relativitätstheorie widerlegt⁴.

Es gibt aber eine Eigenschaft, die von der Relativitätstheorie nicht angefochten, aber auch nicht erklärt werden kann. Es ist die vierte in der von OSTWALD genannten Reihe: die Einsinnigkeit der Zeit, ihre feste Richtung. Offenkundig unbeeinflussbar bleibt sie auch unter extremen Randbedingungen erhalten. Für Grenzfälle der Bewegung (bei Lichtgeschwindigkeit) und der Gravitation (im Schwarzen Loch) verkündet die Relativitätstheorie den Stillstand, aber niemals eine Umkehrung des Laufs der Zeit. Niemand sieht die Reihenfolge von Früher

⁴ EINSTEINS spezielle Relativitätstheorie wurde 1905 veröffentlicht. Der erste, der EINSTEIN für den Nobelpreis nominierte, war Wilhelm OSTWALD (Nobelpreisträger für Chemie 1909). Er wiederholte seine Nominierung 1912 und 1913. In allen drei Fällen begründete er sie mit der Relativitätstheorie und verglich EINSTEINS Beiträge mit KOPERNIKUS' und DARWINS Werk [8].

oder Später umgekehrt, nur weil er sich in rascher Bewegung oder nahe einer großen Masse befindet.

Für viele Entwicklungen lässt sich begründen, warum sie in nur einer Richtung verlaufen. Beispiel sind Prozesse, wo die Wahrscheinlichkeit die Richtung bestimmt: Der heiße Kaffee wird ohne unser Zutun immer nur kälter, niemals wärmer. Ein vom Tisch gestoßenes Weinglas zerschellt am Boden und wird sich niemals wieder zusammenfügen. Ein ins klare Wasser gegebener Farbtropfen wird sich ausbreiten, seine Moleküle werden infolge der Zusammenstöße mit den Wassermolekülen statistisch verteilt und niemals wieder zusammengeführt.

Diese Beispiele haben gemein, dass ihre Umkehrung zwar nicht gänzlich unmöglich ist, aber doch äußerst unwahrscheinlich. An einem rückwärts abgespulten Film solcher Prozesse würde man deshalb ohne weiteres dessen „falsche“ Richtung erkennen.

Wie gesagt, regiert hier die Wahrscheinlichkeit die Richtung der Entwicklung. In der Sprache des II. Hauptsatzes der Wärmelehre lautet das: der Grad der Unordnung oder die Entropie wächst. Die Entropie von statistisch ablaufenden Prozessen wächst, falls man das System sich selbst überlässt. Die Grenzen und Schwierigkeit unserer Diskussion werden uns aber bewusst, wenn wir bedenken, dass der Wahrscheinlichkeitsbegriff selbst das Vorher und Nachher, also eine Richtung schon beinhaltet. Die Zeitrichtung ist fundamentaler und lässt sich sicher nicht mit dem Entropiebegriff erklären. Insbesondere beim biologischen Alterungsprozess ist das evident.

Viele Kosmologen und Physiker sehen einen engen Zusammenhang zwischen der Zeitrichtung und der Ausdehnung des Weltraums. Mit dem Urknall hat die Zeit begonnen und es blieb ihr gewissermaßen keine andere Wahl, als nur in einer Richtung fortzuschreiten, sich auszudehnen wie das Universum. Stephen HAWKING hatte vorübergehend daraus den Schluss gezogen, dass im Falle eines Endes der Expansion und einer Umkehr zum gegenteiligen Prozess des Schrumpfens sich auch die Richtung der Zeit umkehren müsse. Im Rückblick räumte HAWKING ein, dass er von einem zu einfachen Modell des Universums ausgegangen war. Sein Irrtum aber demonstriert die Schwierigkeit des Problems.

Die Richtung der Zeit bleibt wie die Zeit selbst ein Rätsel. Vermutlich sind wir - selbst ein Produkt der Zeit - prinzipiell nicht befähigt, es zu lösen. Uns fehlt der Blick des Unbeteiligten von außen.

Mir gefällt bei all seiner Banalität der Inhalt des an die Wand eines texanischen Studentencafés gesprühten Graffitos:

„Zeit ist die Methode der Natur, mit der sie verhindert, dass alles auf einmal geschieht“. Zeit ermöglicht also das Nacheinander von Ereignissen so, wie der Raum das Nebeneinander von Gegenständen gestattet. Nicht aufregend, aber doch als Schlusswort geeignet. Die Relativitätstheorie lehrt uns zudem, dass die Zeit untrennbar mit dem Raum verknüpft ist und Zeit sowie Raum nur verschiedene Aspekte der übergeordneten Raumzeit sind.

Literatur

- [1] STEPHENSON, F. R.: Warum die Tage länger werden. Spektrum der Wissenschaft 10 (2007), S. 36-45.
- [2] EINSTEIN, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 17 (1905), S. 891-921; Einstein, A.: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. 23. Aufl. Braunschweig / Wiesbaden: Vieweg, 1988.
- [3] HAFELE, J. C.; KEATING, R. E.: Around-the-world atomic clocks: observed relativistic time gains. Science 177 (1972), S. 168-170.
- [4] SEXL, R.; SCHMIDT, H. K.: Raum-Zeit-Relativität. Braunschweig: Vieweg, 1989.
- [5] GENZ, H.: Gedankenexperimente. Physik in unserer Zeit 3 (2002), S. 226-229.
- [6] WEINBERG, S.: Die ersten drei Minuten. München: DTV, 1980, S. 156.
- [7] OSTWALD, W.: Das Problem der Zeit. In: Das physikalisch-chemische Institut der Universität Leipzig und die Feier seiner Eröffnung. Leipzig: Engelmann, 1898, S. 30.
- [8] PAIS, A.: Raffiniert ist der Herrgott... Albert Einstein. Eine wissenschaftliche Biographie. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1986, S. 507.

Bildnachweis

- Abb. 1 Angelehnt an ein Bild des Magazins der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB: Zeitgeschichten
- Abb. 2 galileo-motion, San Diego University, sdsu-physics.org, leicht verändert
- Abb. 3 NASA
- Abb. 4 Time Magazine
- Abb. 5 Zusammengesetzt aus Bildern der NASA
- Abb. 6 Bild der Wissenschaft 11/2009
- Abb. 7 Mit freundlicher Genehmigung des Karikaturisten Oswald Huber, Schweiz