

Raum, Zeit und Raum-Zeit

EINE REISE DURCH DIE ZEIT VON NEWTON BIS EINSTEIN

Im Bewusstsein des Menschen gibt es wohl kaum ein vergleichbar rätselhaftes und dennoch alltägliches Phänomen wie die Zeit. Auch bei genauem Betrachten ist sie nur schwer zu fassen. Wahrscheinlich hat nahezu jeder bei dem Begriff »Zeit« zunächst irgendeine Form von Uhr vor Augen. Aber die Uhr ist lediglich eine Darstellung eines von uns Menschen festgelegten Ablaufes von ... ja, wovon eigentlich? – fragt ein Professor für Experimentalphysik der Leibniz Universität Hannover.

»Was ist Zeit? Es wäre schön, wenn wir eine gute Definition der Zeit finden würden ... was jedoch wirklich wichtig ist, ist nicht, wie wir Zeit definieren, sondern wie wir sie messen. Eine Möglichkeit, Zeit zu messen, ist die Bewegung von etwas, das immer wieder in regelmäßiger Art geschieht – etwas Periodischem.«

Richard Feynman (1918–1988)

Die Vielschichtigkeit des »Phänomens Zeit«, dem im Rahmen dieser Vortragsreihe nachgegangen wurde, hat die Menschheit wohl seit ihren Anfängen beschäftigt und auch ihre tiefstnigsten Wissenschaftler bis heute immer wieder an die Grenzen ihres Verständnisses getrieben. Dennoch, auch in der Physik wird – meist ganz selbstverständlich – von der Zeit Gebrauch gemacht, als sei sie ein uns immerwährend umgebendes Maß, an das alle Prozesse gleichermaßen gekoppelt seien. Erst ein tieferes theoretisches Eindringen in diese Materie sowie der Versuch, die uns umgebende Natur auf allen Größenskalen widerspruchsfrei beschreiben zu können, als auch die Analyse und Interpretation gezielter Experimente haben uns genötigt, »lieb-gewordene«, überkommene Vorstellungen zur Zeit über Bord zu werfen. Mehr noch, solche Untersuchungen und die hieraus erwachsenen Fragestellungen haben im Laufe der Geschichte zu heraus-

ragenden Erkenntnissprüngen nicht nur in der Physik geführt.

In diesem Beitrag wird versucht, diese Einsichten und die sich daraus ergebenden Konsequenzen aus Sicht der Physik – soweit das in der Kürze eines solchen Beitrages überhaupt möglich ist – zu skizzieren und auch für »Nicht-Physiker« plastisch werden zu lassen.

Die Zeit aus physikalischer Sicht

Die Zeit, wie wir sie erleben und auf die wir praktisch alle Entwicklungen beziehen, beginnt mit dem Urknall. Zu diesem Zeitpunkt, und als ein solcher muss er im wahrsten Sinne des Wortes betrachtet werden, nimmt die Evolution des Universums ihren Lauf, nun seit über 13,75 Milliarden Jahren.

Dies ist nicht nur ein unvorstellbar langer Zeitraum, sondern betrifft auch räumlich zahlreiche Größenskalen, von den unvorstellbar kleinen Elementarteilchen bis hin zu den riesigen Strukturen unseres Universums. Hier deutet sich schon an, dass die physikalische Zeitvorstellung auch mit der räumlichen Vorstellung (*was ist Raum*) stark verknüpft ist, ja, dass man sogar beides gleichzeitig betrachten muss in

der so genannten *Raum-Zeit*. Das Universum stellt sich uns als ein dreidimensionaler Raum dar, in dem, neben den drei uns bekannten Raumdimensionen Höhe, Breite und Tiefe, auch die Zeit, als eine vierte Dimension, eine wichtige Rolle einnimmt. Mehr noch, wenn wir diese Zusammenhänge genauer betrachten, muss man einen weiteren, wichtigen Faktor in unserem Universum miteinbinden, nämlich die Geometrie des Raumes oder die Gravitation; die Schwerkraft, die dafür verantwortlich ist, dass zum Beispiel ein Apfel zu Boden fällt.

Um also die Zeit aus physikalischer Sicht ergründen zu können, müssen wir uns im Grunde drei miteinander verwobenen Bereichen widmen: Gravitation, Raum und Zeit.

Auch wenn es eines Genies wie Einstein bedurfte, um diese komplexen Zusammenhänge aufzuklären, so soll doch hier der Versuch unternommen werden, zumindest eine griffige Vorstellung vom Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie und damit zur physikalischen Größe »Zeit« zu gewinnen.

Die antiken Anfänge

Aristoteles (384–322 v. Chr.) hat die Natur, so wie sie sich uns darstellt, beobachtet und

versuchte allein durch diese Betrachtung zu verstehen, welchen Gesetzen die Natur unterliegt. Eine seiner wohl entscheidenden Erkenntnisse war dabei die Aussage, dass nicht nur die Bewegung mittels Zeit, sondern auch die Zeit mittels Bewegung gemessen werden kann. Da sich, so war sich Aristoteles sicher, beide wechselseitig bestimmen. Für ihn war Zeit vor allem die Veränderung, die Bewegung und die Beschreibung dieser

derem, dass alle Körper gleich schnell fallen. Die von Galileo aufgestellten Bewegungsgesetze dienten dann als Basis für bahnbrechende theoretische Arbeiten Sir Isaac Newtons (1643–1727), der als einer der Begründer der modernen Physik angesehen werden kann. Newton machte sich vor allem die Mathematik zu Nutze, um nicht nur die Bewegungsgesetze Galileos in eleganten physikalischen Gesetzen und Formeln präzise zu beschreiben.

ton existierte also keine absolute Bewegung, die als allgemeine Referenz hätte dienen können. Allerdings war Newton noch der festen Überzeugung, es existiere ein absoluter Raum, unbeeinflusst von den Dingen im Raum. Er nannte diesen Raum, von der Theologie nicht ganz unbeeinflusst, das »Sensorium Gottes«.

Zur gleichen Zeit wie Newton beschäftigte sich auch der Universalgelehrte Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646–1716) mit Theorien zu Raum und Zeit. Für ihn ergab die Aussage Newtons zum »Sensorium Gottes« allerdings keinen Sinn. Aus seiner Sicht waren es vielmehr die Dinge im Raum, die seine Existenz ausmachen.

Diese stark vom so genannten »gesunden Menschenverstand« geprägten Vorstellungen vom absoluten Raum und der absoluten Zeit gerieten aber ins Wanken, als die Physik begann, sich näher mit den Eigenschaften des Lichts zu beschäftigen.

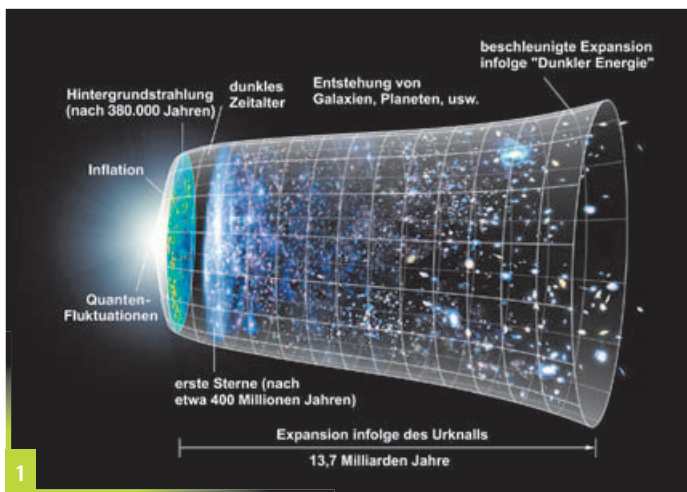


Abbildung 1
Der Beginn von Raum und Zeit. Mit dem Urknall vor rund 13,7 Milliarden Jahren beginnt die Zeit, wie wir sie kennen. Albert Einstein (1879–1955) war einer der ersten, der die Zeit als vierte Dimension im Universum als wichtigen Faktor genauer betrachtete.
 Quelle: NASA

Prozesse. Weiterhin erkannte Aristoteles die Zeit als ein Kontinuum: sie fließt gleichmäßig und unaufhörlich, ohne Unterbrechung jeglicher Art. Darüber hinaus bemerkte er, dass Zeitintervalle zwischen zwei Ereignissen immer eindeutig bestimmbar sind und die Zeit immer dieselbe bleibt, unabhängig davon, wo sie gemessen wird und wer sie misst, gleiche Uhren vorausgesetzt. Er prägte damit den Begriff der »Absoluten Zeit«.

Erst viel später war Galileo Galilei (1564–1642) einer der ersten Naturforscher, der die Welt nicht nur durch ihre Beobachtung allein, sondern anhand von Experimenten zu verstehen versuchte. Bekannt sind vor allem seine Experimente zur Bewegung von Körpern. So erkannte er unter an-

Sie fanden ihren Niederschlag in der Veröffentlichung der berühmten »Principia Mathematica«.

Newton erkannte – im Gegensatz zur damals gängigen Vorstellung – folgende Gesetzmäßigkeit: Wenn keine Kraft auf einen Körper wirkt, ändert sich sein Zustand auch nicht. Demnach bleibt ein ruhender Körper also in Ruhe, ein Körper in Bewegung setzt seine Bewegung ungehindert fort. Außerdem erkannte er, dass es, im Gegensatz zur Anschauung Aristoteles, der die Erde noch als Mittelpunkt des Universums sah, keinen ruhenden Punkt im Universum gibt, auf den man sich beziehen könnte. Der Mond dreht sich um die Erde, die Erde bewegt sich um die Sonne, die Sonne bewegt sich im Universum. Für New-

Die Lichtgeschwindigkeit ist endlich und überall gleich groß

Einer der ersten, der sich näher mit dem Verhalten von Licht auseinandersetzte, war der dänische Astronom Ole Christensen Rømer (1644–1710). Bekannt wurde er vor allem durch seine Beobachtungen der Jupitermonde und dem ersten Nachweis, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich und nicht unendlich groß ist; eine Frage, die bis dahin kontrovers diskutiert worden ist. Mit vergleichsweise einfachen Mitteln hatte er eine für die damalige Zeit noch unglaubliche Geschwindigkeit von etwa 224.000 km/s herausgefunden (moderne Messungen kommen auf rund 300.000 km/s). Die Entdeckung der endlichen, beziehungsweise konstanten

Lichtgeschwindigkeit, beschäftigte rund 200 Jahre später auch den schottischen Physiker James Clark Maxwell (1831–1879). Er untersuchte die Eigenschaften und Ausbreitungsgeschwindigkeiten von elektromagnetischen Wellen und machte eine erstaunliche Entdeckung. Nach den von Galileo und Newton aufgestellten Bewegungsgesetzen müsste für einen ruhenden Betrachter auch die Lichtgeschwindigkeit in einem be-

Grundstein für einen der genialsten Wissenschaftler aller Zeiten, der als erster eine ohne festes Bezugssystem auskommende Theorie zu Raum und Zeit präsentierte und so weder den Begriff der »Absoluten Zeit« noch des »Absoluten Raumes« benötigte.

Im Jahre 1905, dem Annus Mirabilis, veröffentlichte Albert Einstein (1879–1955) insgesamt vier Aufsätze, die praktisch alle bis dahin existierenden

gibt es eine absolute Zeit, wie Newton noch der festen Überzeugung war. Die Struktur von Raum und Zeit sind einzig und allein von der Schwerkraft und die sie bestimmenden Massen beeinflusst, und dies sogar wechselseitig.

Die moderne Physik befindet sich mittlerweile in der positiven Situation, durch die enormen Fortschritte in der Grundlagenforschung die vor über hundert Jahren von Einstein

Abbildung 2
Schon Albert Einstein erkannte Anfang des 20. Jahrhunderts, dass baugleiche Uhren abhängig von ihrer Position und Geschwindigkeit zur Schwerkraft unterschiedlich schnell »ticken«.
Quelle: Piet Schmidt

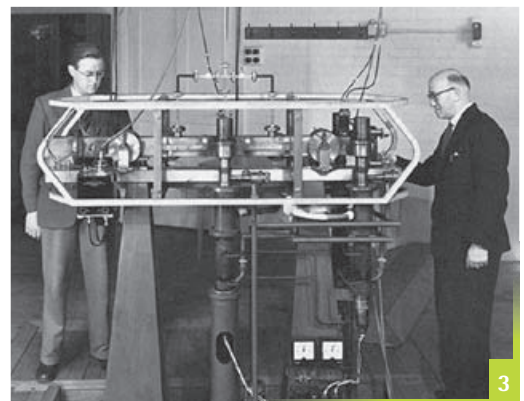
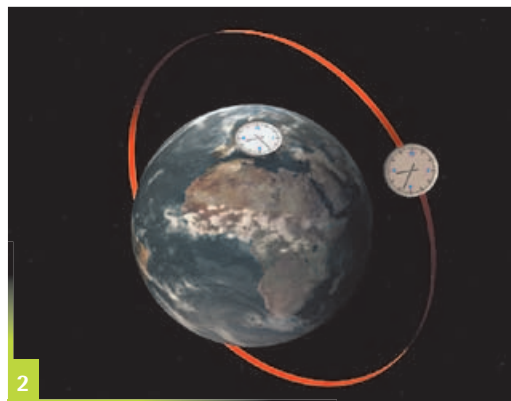


Abbildung 3
Die beiden Physiker Louis Essen und J. V. L. Parry präsentierten 1955 die erste Cäsium-Atomuhr der Welt. Ihre Präzision überragte alle bis dahin bekannten mechanischen und elektronischen Uhren und eröffnete eine vollkommen neue Ära in der Zeitmessung.
Foto: National Physical Laboratory

wegten System schneller sein als in einem ruhenden System: die Geschwindigkeiten müssten sich addieren. Dies war aber nicht der Fall, die Lichtgeschwindigkeit bleibt für den Betrachter in beiden Systemen konstant. Um dies zu erklären und sicherlich auch um nicht mit den bis dahin gültigen Theorien in Konflikt zu kommen, musste für Maxwell ein Ausbreitungsmedium existieren, in dem sich das Licht mit einer definierten Maximalgeschwindigkeit ausbreitete; analog zum Wasser für Wellenbewegung oder der Luft als Träger akustischer Wellen. Er prägte damals den Begriff des so genannten »Lichtäthers«. Bereits kurze Zeit später waren es die beiden Wissenschaftler Albert Abraham Michelson und Edward Morley, die 1887 in einem aufwändigen Experiment die Existenz eines solchen Äthers widerlegten. Sie legten damit den

Vorstellungen zu Raum und Zeit gründlich auf den Kopf stellten. Hier legte der junge Einstein den Grundstein für die Spezielle Relativitätstheorie und machte die ersten Aussagen zum Äquivalenzprinzip, der eigentlichen Basis seiner wohl bekanntesten Theorie, der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Allgemeine Relativitätstheorie von 1915 an dieser Stelle im Detail zu betrachten, ist im Rahmen dieses Beitrages natürlich kaum möglich. Aber es ist vor allem die eine, alles auf der Erde beherrschende Kraft, die Einstein in seinen Theorien berücksichtigte und die uns an dieser Stelle interessieren sollte, die Schwerkraft. Einstein konnte durch seine Überlegungen vor allem zwei Dinge widerlegen. Es existiert kein absoluter Raum mit einem festen Bezugspunkt für den Betrachter. Ebenso wenig

noch wesentlich durch reine Gedankenspiele aufgestellten Theorien experimentell überprüfen zu können – und zwar ohne bisher Abweichungen zu finden. Bei diesen Tests der Relativitätstheorie reicht die Genauigkeit klassischer Uhren in keiner Weise aus.

Zeit am Limit: Moderne Atomuhren und ihr Einfluss

Die Messung der Zeit war in der Vergangenheit stark durch die Astronomie und ihre Beobachtung periodischer Prozesse in der Bewegung von Planeten und Monden in unserem Sonnensystem geprägt. Parallel gab es immer wieder Entwicklungen innovativer Uhrenkonzepte. Hier setzten sich Techniken durch, die auf der Bewegung von Pendeln oder Drehpendeln basierten. Allerdings war deren Zeitmaß (Periode) durch vielfältige äußere

Einflüsse, wie zum Beispiel die Temperaturwirkung auf die Länge der Pendel oder – bei moderneren Quarzuhren – auf die Schwingungsfrequenz der Quarze, trotz aller technischer Raffinesse, stark eingeschränkt. Dies änderte sich erst dadurch, dass man als Taktgeber nicht mehr die Schwingungsperiode von hand- oder maschinell gefertigten Bauteilen (Pendeln, Schwingquarzen) und damit immer leicht unterschiedlichen, individuellen Komponenten verwandte, sondern sich auf die Schwingungen bestimmter Atome, wie beispielsweise Cäsiumatome, als Referenz verließ. Atome sind überall auf der Welt immer gleich und ihre Schwingungen hängen nicht vom handwerklichen Können eines Uhrmachers ab. Sie eignen sich daher als unabhängige und berechenbare, im Idealfall unabänderliche allgemeine Vergleichsmöglichkeit.

Die beiden Physiker Louis Essen und J. V. L. Parry präsentierten der Welt 1955 die erste Cäsium-Atomuhr und damit den Beginn einer neuen Ära in der Zeitmessung. Ihre Präzision hat seitdem die astronomischen, mechanischen oder elektronischen Vorbilder in unvorstellbarer Weise überholt. Sie bilden die Basis aller internationalen Vergleichsstandards für die Verteilung der Zeitsignale, zum Beispiel für die sich automatisch anpassenden Funkuhren.

Die Sekunde der »gesetzlichen Zeit« ist definiert als die Dauer von 9.162.631.770 Perioden der Schwingung zwischen den beiden Grundzuständen des ¹³³Cäsiumatoms. Oder anders ausgedrückt ... wenn eine klassische Pendeluhr genauso präzise wie eine Atomuhr funktionieren sollte, müsste das Pendel 9.162.631.770mal hin und her pendeln, bis der Sekundenzeiger einen Strich

auf dem Ziffernblatt weiter-rücken würde.

Atomuhren spielen vor allem dort eine wesentliche Rolle, wo einheitliche Messverfahren, beispielsweise bei Zeitvergleichen über weite Entfernungen, oder bei der globalen Satellitennavigation, eine wesentliche Bedeutung haben.

Ein weiteres Beispiel für die zukünftige Anwendung von Atomuhren ist die Erdschwerefeldmessung, oder in der Wissenschaft etwas genauer auch als »Relativistische Geodäsie« bezeichnet. Wie wir bereits durch Einstein wissen, gehen baugleiche Uhren abhängig von ihrer Position im Raum, also im Einfluss der Schwerkraft, unterschiedlich, wenn auch nur minimal. Hebt man zum Beispiel auf einem Tisch von zwei absolut gleich »tickenden« Uhren eine um einen Meter an, so wird sie etwa um 10^{-16} Sekunden vorgehen, sie läuft also schneller. Zurzeit werden aber bereits so genannte optische Atomuhren erforscht, deren »Pendel« mit der Frequenz des Lichtes (circa 5×10^{14} Hz) oszilliert und bereits im Präzisionsbereich von 10^{-18} arbeiten. So ist es durch hochgenaue Atomuhren prinzipiell möglich, Uhren auf Satelliten mit Uhren auf der Erde, aber auch Uhren auf der Erde und auf Satelliten untereinander zu vergleichen und so über den Gangunterschied der Uhren ein Abbild von der räumlichen und möglicherweise zeitlichen Variation der Erdschwere zu erhalten. Diese Erdbeobachtung liefert dann vielfältige Einblicke in Prozesse wie das Abschmelzen großer Eismassen oder die langsame Veränderung des Grundwasserspiegels ganzer Regionen.

Modernste Laserphysik bildet aber nicht nur die Grundlage präzisester Atomuhren, sondern ist auch in der Lage, ultraschnelle Prozesse auf atoma-

rer und molekularer Ebene mit zeitlich extrem kurzen Pulsen – inzwischen bis in den Attosekundenbereich (10^{-18} s) – abzutasten. Es ergeben sich so zum Beispiel Einblicke in Prozesse bei der Proteinchemie.

Die Zeiträume, die die moderne Physik in ihrer Forschung überspannt, beginnen folglich beim Urknall vor circa 13,75 Milliarden Jahren, ermöglichen in Kurzzeitmessungen den Attosekundenbereich (10^{-18} s) und erschließen in der Hochenergiephysik Prozesse, die nochmals erheblich kürzer sind.

Dennoch, auch aus der Sicht der Physik, sind noch zahlreiche Fragen zur Zeit, oder besser zur Raum-Zeit, ihre Rolle in der erkenntnistheoretischen Wahrnehmung und der Kosmologie offen und unbeantwortet. Ja es gibt sogar Ansätze, sie sei ein »künstlicher, menschlicher« (Hilfs-) Parameter bei Abbildung der Realität in unserem Bewusstsein und – wie im Beitrag von Julian Barbour in dieser Ausgabe dargelegt – die Physik käme auch völlig ohne die Zeit aus.

Danksagung des Autors

Mein Dank geht an Jan Mahnke für die Unterstützung bei der Bildauswahl und der Vorbereitung des Vortrages im Rahmen dieser Vorlesungsreihe. Außerdem bedanke ich mich ganz herzlich bei Dr. Ude Cieluch für seine Hilfe bei der Anfertigung des Manuskriptes zu diesem Beitrag.



Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Jahrgang 1949, ist seit 1994 Professor für Experimentalphysik an der Leibniz Universität Hannover sowie seit November 2007 Koordinator des Exzellenzclusters QUEST »Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research«. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Atomoptik, Quantenoptik, Präzisionsmetrologie und Biophotonik. Kontakt: ertmer@iqo.uni-hannover.de