

Paper Title: Über die Entwicklung des Zeitbegriffs

Author: Aichelburg, Peter Christian

Institutional Affiliation: Professor für Physik, Institut f. theoretische Physik der Universität Wien

This paper was prepared for "Science and Religion: Global Perspectives", June 4-8, 2005, in Philadelphia, PA, USA, a program of the Metanexus Institute (www.metanexus.net).

Abstract:

From the ancient Greeks, the concept of time has evolved over a period of more than two thousand years. With the emergence of the individual sciences, the problem has shifted from philosophy towards the natural sciences. Physics, as the basis of fundamental science, plays an essential role. At the beginning of the last century, the concept of time was revolutionized by Einstein's Theory of Relativity. What are the logical connections of the modern concept of time to the ancient philosophy?

I compare the ideas of Aristotle on time with those in post Einsteinian physics and shall argue that this comparison suggests an interesting interpretation in modern cosmology.

Biography:

Peter C. Aichelburg is Professor for theoretical Physics at the Institut für Theoretische Physik, Universität Wien, in Vienna, Austria

Born in Vienna, his education includes elementary school Vienna and Ascona (Switzerland), secondary education Caracas, Venezuela and Barbados, PhD in Physics and Mathematics, University of Vienna (1967). He was a research fellow at the "International Centre for Theoretical Physics", Trieste, Italy (1968-69) and lecturer at the "Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzanti in Trieste" (SISSA), Trieste, Italy (1981-86). He has been an Assistant (1974), associate (1980) full Professor (2000) at the University of Vienna. He is director of the Institute for theoretical Physics, University of Vienna (1984-86, 1990-92) and head of the advisory board to the *European Forum Alpbach* (2001-). His scientific publications are on gravitational physics, cosmology and classical field theory. His books include: "*Albert Einstein; his Influence on Physics, Philosophy and Politics*", P.C Aichelburg u. R.U.Sexl, Vieweg (1979), translations German and Japanese; „*Evolution, Entwicklungsprinzipien und menschliches Selbstverständnis in einer sich verwandelnden Welt*“, Hrg. P.C. Aichelburg u. R. Kögerler, Verl. Niederösterreich. Pressehaus (1979); and "*Zeit im Wandel der Zeit*", P.C.Aichelburg Hrg., Vieweg (1988).

Paper Text:

Von der Antike her hat sich über mehr als zwei Jahrtausende der Zeitbegriff entwickelt. Ausgehend von den griechischen Philosophen, verschiebt sich mit der Entstehung der Einzelwissenschaften die Thematik von der Philosophie mehr und mehr zu den Naturwissenschaften. Dabei kommt der Physik als Grundwissenschaft eine besondere Rolle zu. Innerhalb der Physik hat wiederum die Einsteinsche Relativitätstheorie den Zeitbegriff der modernen Physik am nachhaltigsten geprägt. In welchem logischen Zusammenhang steht der moderne naturwissenschaftlich Zeitbegriff mit jenem der Antike?

Was also ist die Zeit, fragt Augustinus im 4. Jahrhundert und gibt sich selbst die berühmt gewordene Antwort [1]:

"Wenn mich niemand danach fragt, weiß ich's; will ich's aber einem Fragendem erklären, weiß ich's nicht"

Aristoteles hat sich in seinen „Lehrschriften“ ausführlich mit der Problematik der Zeit befasst. Er spricht jene drei Grundprobleme des Wesen der Zeit an, die im weiteren von Denkern immer wieder aufgegriffen wurden. Es sind dies die Frage nach der Existenz der Zeit, der Zusammenhang von Zeit und Bewegung bzw. Wandlung und das Problem der Stetigkeit.

ZEIT UND BEWEGUNG

Aristoteles bringt Zeit in Zusammenhang mit Bewegung und versucht herauszufinden, was an der Bewegung die Zeit ist. Er fasst Zeit als Wandlung der Dinge auf, aber die Wandlung selbst ist nicht die Zeit [2]:

"..dass die Zeit weder Bewegung ist noch ohne Bewegung.... Wir messen aber nicht nur Bewegung durch die Zeit sondern auch Zeit durch die Bewegung."

Zunächst scheint diese Aussagen wenig hilfreich: Dass wir Bewegung durch Zeit messen ist uns z.B. bei der Messung von Geschwindigkeit geläufig. Ebenso kennen wir die Messung von Zeit durch Bewegung: man denke an die Zeiger einer Uhr, deren Bewegung uns die Zeit zeigen. Aristoteles ist sich der Problematik dieses Zirkelschlusses bewusst. Welche Bewegung bestimmt also die Zeit? Er argumentiert, dass es schnelle und langsame Bewegungen gibt aber die Zeit ist dieselbe. Der entscheidende Gedanke bei Aristoteles ist die Auszeichnung einer bestimmten „begrenzten“ Bewegung, nämlich die der Kreisbewegung:

*"Da es eine Ortsveränderung gibt, unter diesen wieder die Kreisbewegung, so wird alles durch etwas Gleichnamiges gezählt. ...Gemessen wird die Zeit durch die Bewegung und diese durch die Zeit. Dies ist möglich, weil von einer **begrenzten Bewegung** ausgehend durch deren Zeit zugleich die Größe der Bewegung und die der Zeit gemessen wird"*

Was aber ist diese "begrenzte Bewegung"? Seine Antwort lautet:

*"Das ist der Grund, warum die **Zeit die Bewegung der Himmelskugel** zu sein scheint, weil durch diese alle anderen Bewegungen gemessen werden und durch sie die Zeit"*.

Aristoteles führte 55 Sphären ein um die Bewegung der Gestirne Sterne zu erklären. Für ihn ist durch die Bewegung der Himmelsphären die Zeit bestimmt. Er meint damit vor allem die scheinbare Bewegung der Fixsterne. Ohne diese Bewegung kein Zeitmaß und auch keine Zeit. Verallgemeinert könnte man sagen, die Bewegung der Körper im Weltall bestimmen die Zeit.

Bevor ich diese Aussage mit dem modernen Zeitbegriff kontrastiere, sei kurz an einige in diesem Zusammenhang wichtige Stationen in der Entwicklung des Zeitbegriffs erinnert. Der schon erwähnte Augustinus kritisiert Aristoteles in seinen „Bekennnissen“ mit folgendem anschaulichen Beispiel [1]:

" Ich hörte einen gelehrten Mann sagen, der Sonne, des Mondes und der Gestirne Bewegung das seien die Zeiten.....Warum dann nicht die Bewegung aller Körper? Wie, wenn die Himmelslichter still ständen, aber eine Töpferscheibe bewegt sich noch, gäbe es dann keine Zeit mehr, ihre Drehungen zu messen "

Er übt also Kritik an der Auszeichnung der Bewegung der Himmelskörper als Zeit. Noch deutlicher ist er im folgenden Beispiel:

"So sage mir niemand, die Bewegung der Himmelskörper sei die Zeit, denn auch damals, als die Sonne auf den Befehl eines Mannes stillstand, daß er siegreich die Schlacht vollenden konnte, stand sie wohl still, doch die Zeit ging fort. Denn in dem Zeitraum, dessen jene Schlacht bedurfte, ward sie geschlagen und beendet."

Augustinus bezieht sich hier auf die Schilderung der Schlacht Josuas gegen die Amoriter aus dem alten Testament.

DIE ABSOLUTE ZEIT

Mehr als tausend Jahre später nimmt Newton die Kritik Augustinus auf und postuliert die Existenz einer absoluten Zeit, losgelöst von aller Bewegung [3]:

"Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig, und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. „, schreibt er in seiner "Philosophiae naturalis .principia mathmatica"

Er schränkt aber ein, dass diese absolute Zeit eigentlich nicht messbar ist:

"Es ist möglich, dass keine gleichförmige Bewegung existiert, durch welche die Zeit genau gemessen werden kann, alle Bewegungen können beschleunigt oder verzögert werden, allein der Verlauf der absoluten Zeit kann nicht geändert werden".

Neben der absoluten Zeit führt Newton noch den absoluten Raum ein, bezüglich dem der Begriff der Ruhe und Bewegung eindeutig gegeben ist.

Der österreichische Physiker und Naturphilosoph Ernst Mach nimmt in seinem Werk *"Mechanik, in ihrer Entwicklung, historisch kritisch dargestellt"*, die Kritik an Newtons absoluten Zeitbegriff auf. Nach Mach wird Newton mit der Definition der absoluten Zeit seiner Absicht, nur das Tatsächliche zu untersuchen, nicht gerecht [4]:

"Diese absolute Zeit kann an gar keiner Bewegung abgemessen werden, sie hat also gar keinen praktischen und auch keinen wissenschaftlichen Wert...Wir sind ganz außerstande, die Veränderung der Dinge an der Zeit zu messen. Die Zeit ist vielmehr eine Abstraktion, zu der wir durch die Veränderung der Dinge gelangen, weil wir auf kein bestimmtes Maß angewiesen sind, da eben alle untereinander zusammenhängen".

Mach will damit sagen, dass wir nicht eine bestimmte Bewegung als Maß der Zeit auszeichnen müssen, sondern, weil alle *"untereinander zusammenhängen"*, gelangen wir zu einer konsistenten Abstraktion, die wir mit **Zeit** bezeichnen. Nach Mach ist die absolute Zeit ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand unbrauchbares Konstrukt. Demgegenüber könnte jedoch das Zusammenspiel sämtlicher Komponenten des Weltalls zu einer universellen Zeit führen.

VON DER ABSOLUTEN ZUR RELATIVEN ZEIT

Über 200 Jahre war, aller Kritik zum Trotz, Newtons absoluter Zeitbegriff das Fundament physikalischer Naturbeschreibung. Vor allem in der klassischen Himmelsmechanik, etwa bei der Beschreibung der Planetenbahnen, der Vorhersage von Mond- und Sonnenfinsternissen

sowie bei der Analyse bei Doppelsternsystemen lieferte die Newtonsche Theorie ausgezeichnete Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Anfang des 20. Jahrhunderts jedoch hat mit Lorentz, Poincare und vor allem Einstein eine Revision des klassischen Zeitbegriffs eingesetzt. Hatten bis dahin Raum und Zeit als voneinander unabhängig gegolten, entsteht nun der Begriff der **Raumzeit**. Im Jahre 1908, also drei Jahre nach der grundlegenden Arbeit zur Speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein, hält Hermann Minkowski auf der Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte einen Vortrag mit dem Titel "Raum und Zeit" und sagt in seiner Einleitung [5]:

"Die Anschauung über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Die Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen Raum und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren."

Der Ausgangspunkt zur Relativitätstheorie war für Einstein die Analyse des Begriffs der Gleichzeitigkeit. In der vorhin erwähnten Arbeit von 1905 schreibt er [6] :

*"Wir haben zu berücksichtigen, dass alle Urteile, in welchen die Zeit eine Rolle spielt, immer Urteile über **gleichzeitige Ereignisse** sind"*.

Was heißt es, zwei räumlich getrennte Ereignisse sind gleichzeitig? Und die damit verbundene Frage: Wie lassen sich zwei voneinander entfernte Uhren synchronisieren? Intuitiv glauben wir zu wissen, was gleichzeitig ist: Ereignisse, die wir im selben Augenblick wahrnehmen. Tatsächlich ist dies jedoch ungenau, da sich jedes Signal nur mit endlicher Geschwindigkeit fortpflanzt. Selbst bei Licht erreicht uns das von entfernten Objekten später als das von nahen. Wir sehen daher entfernte Objekte "jünger" als nähere. Im täglichen Leben spielt dies wegen der großen Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen keine Rolle, doch ist dieser Effekt in der Astronomie geläufig. Je tiefer wir in das Weltall hinausschauen, umso weiter blicken wir auch in die Vergangenheit.

Unsere visuelle und damit unsere Wahrnehmung im allgemeinen liefert daher kein "gleichzeitiges Bild" der Außenwelt. Nun kann man dem entgegenhalten, dass unter Berücksichtigung der Signalgeschwindigkeit, die Gleichzeitigkeit errechenbar ist. Hier setzt nun die Relativitätstheorie ein: Während nach der Newtonschen Theorie wegen der Existenz einer absoluten Zeit die Gleichzeitigkeit eindeutig gegeben ist, ist dies nach Einstein nicht mehr der Fall. Nach Einstein ist die Gleichzeitigkeit nicht eindeutig konstruierbar, sondern hängt vom Bewegungszustand des Beobachters ab.

Auf die philosophischen Implikationen dieser neuen Struktur hat der Mathematiker Kurt Gödel hingewiesen. In einem kurzen Aufsatz mit dem Titel *"Eine Bemerkung über die Beziehungen zwischen der Relativitätstheorie und der idealistischen Philosophie"* schreibt er [7]:

"Es scheint, dass man einen eindeutigen Beweis für die Ansicht jener Philosophen erhält, die, wie Parmenides, Kant und die modernen Idealisten, die Objektivität des Wechsels leugnen und diesen als eine Illusion oder als Erscheinung betrachten, die wir unserer besonderen Art der Wahrnehmung verdanken...."

Mit der Relativitätstheorie verliert der Begriff der Gleichzeitigkeit und damit die Existenz einer universellen Zeit ihre Bedeutung. Die Allgemeinen Relativitätstheorie geht noch einen Schritt weiter: Zeit wird nicht nur durch Bewegung beeinflusst sondern auch durch vorhandene Massen im Universum: der Uhrengang verlangsamt sich (relativ zu einer weiter entfernten Uhr) in der Nähe großer Massen. Beide Effekte, der Geschwindigkeits- und der

Gravitationseffekt (die i. A. nicht voneinander zu trennen sind) überlagern sich bei der Zeit-Synchronisation der 24 Sattelliten des globalen Positionierungssystems. Die sich daraus ergebende Zeitdifferenz beträgt etwa 26 Nanosekunden (10^{-9}) pro Minute. Damit wäre die erforderliche Genauigkeit in der Positionsbestimmung nach nur zwei Minuten bereits überschritten, und würde auf ca. 11 km in einem Tag anwachsen!

Die Geometrie der Raumzeit und damit die Zeit selbst wird durch die Verteilung der Massen im Universum beeinflusst, sie ist daher der Dynamik unterworfen. Jeder Körper hat somit seine Eigenzeit, die von der Weltlinie durch die Raumzeit bestimmt wird und von der Verteilung und Bewegung der übrigen Massen abhängig ist.

VON DER DYNAMISCHEN ZUR KOSMOLOGISCHEN ZEIT

Die weitreichendste physikalische wie auch philosophische Bedeutung erlangt die Allgemeine Relativitätstheorie im Zusammenhang mit kosmologischen Fragen, Fragen zur Struktur und Entwicklung des Universums als Ganzes. Was hier vor allem von Interesse ist, ist die Frage, wie die Wechselwirkung zwischen Materie und Geometrie den Begriff der Zeit beeinflusst. Zunächst ergeben die Einsteinschen Gleichungen, dass das Universum nicht statisch sein kann. Einstein hatte versucht diese Konsequenz zu umgehen in dem er zu seinen Gleichungen die kosmologische Konstante hinzufügte. Bereits 1929 hat aber der Astronom Edwin Hubble beobachtet, dass sich die Galaxien voneinander entfernen und zwar mit einer Geschwindigkeit, die proportional zu ihrem Abstand ist. Das ganze Universum unterliegt einer Expansion. Diese allumfassende Expansion erlaubt es aber ein universelles Bezugssystem zu definieren und damit eine universelle Zeit: Alle Uhren, die sich mit dem "Hubble Fluss" bewegen, zeigen die gleiche Eigenzeit. Es ist diese Zeit die gemeint ist wenn man sagt, der Urknall liegt 13 Milliarden Jahre zurück.

Damit schließt sich der Kreis: bei Aristoteles wird Zeit durch die „Bewegungen der Himmelskugel“ gemessen, in der modernen Kosmologie ist die universelle Zeit durch die Bewegung des Substrats bestimmt. Aber die Analogie geht tiefer. Aristoteles sagt die ausgezeichnete Bewegung sei die Zeit d.h. ohne diese Bewegung der Himmelskugel gibt es keine Zeit. Die Relativitätstheorie verknüpft die Geometrie der Raum-Zeit mit der Materie. In der Kosmologie bedingt die Materie die Geometrie im Großen und damit die Zeit.

Literatur:

- [1] **Augustinus A.**, *Bekenntnisse*, Übertragen von W. Thimme, Artemis Verlag, 3. Auflage, Zürich 1982, S. 312-328
- [2] **Aristoteles**, *Die Lehrschriften*, Übersetzt von P. Gohlke, Band IV,1, Verlag Ferdinand Schöningh, Paderborn 1956, S. 143-156
- [3] **Newton I.**, *Mathematische Prinzipien der Naturlehre*, Darmstadt 1963, Wissenschaftliche Buchgemeinschaft.
- [4] zitiert aus **Mach E.**, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung, historisch-kritisch dargestellt*, F. A. Brockhaus, 6. Auflage, Leipzig 1908, S. 236
- [5] **Minkowski H.**, *Raum und Zeit*, aus H. A. Lorentz, A. Einstein und H. Minkowski, *Das Relativitätsprinzip*, Teubner, Leipzig 1913, 2. Abdruck 1915, S. 56
- [6] **Einstein A.**, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik Bd. 17, 1905, S. 891
- [7] **Gödel K.**, *Eine Bemerkung über die Beziehungen zwischen der Relativitätstheorie und der idealistischen Philosophie*, in P. A. Schilpp, *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Vieweg, Braunschweig 1979, S. 406-407