

DER ZEITBEGRIFF IN DER PHYSIK

Eine fundierte Einführung in die Zeit von Ille C. Gebeshuber

In diesem Artikel wird der Zeitbegriff der Physik umrissen. Nach einer allgemein gefassten Einleitung wird im ersten Kapitel der Zeitbegriff Newtons präsentiert. Nach dem deterministischen Weltbild Isaac Newtons stehen die Zukunft, die Gegenwart und die Vergangenheit von vornherein fest. Newtons Auffassung von absolutem Raum und absoluter Zeit dominierte über 200 Jahre lang Philosophie und Naturwissenschaft. Ernst Mach bestreitet das Absolute der Zeit. Für Ludwig Boltzmann (österreichischer Physiker und Philosoph, 1844-1906) wird die Frage nach absoluter oder relativer, subjektiver oder objektiver Zeit sogar völlig irrelevant, da in der Thermodynamik, die mit reversiblen Prozessen arbeitet, der Begriff der Zeit nicht benötigt wird. Mit Einsteins Spezieller Relativitätstheorie wird die Zeit in der Physik relativ – Zeit entsteht aus dem Zustand des Betrachters/der Betrachterin. In der Quantenmechanik gibt es keinen Operator, der die Zeit misst. Das hat die Konsequenz, dass es keine Eigenzustände zu einem Zeitoperator gibt. Diese Zustände wären zu einer Zeit und zu keiner anderen, für sie würde die Zeit nicht laufen. Ein Ausblick schließt die Betrachtungen ab.

I. Einleitung

Die älteste Uhr für das Leben auf der Erdoberfläche ist die Sonne. Die erste vom Menschen gemachten Uhr ist die Wasseruhr oder *Klepsydra* (von griechisch „Wasserdieb“), die ca. 1380 v. Chr. in Ägypten verwendet wurde. Es folgten die Sanduhren. Eine Zeitmessung ist immer ein Vergleich von Bezugspunkten, da es keine direkte Möglichkeit gibt, Zeit anhand von äußeren Einflüssen zu messen, wie etwa die Stromstärke oder die Windgeschwindigkeit.

Ist Zeit eine Vorstellungsweise (Kant) oder eine Wirklichkeit, die es gibt? Einstein versteht die Zeit als eine Illusion: „Für uns Physiker ist die Unterscheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nichts als eine Illusion, wie hartnäckig sie sich auch hält. Die subjektive Zeit mit ihrem Be-

stehen auf dem Jetzt hat keine objektive Bedeutung.“

Demgegenüber ist der Chemiker Ilya Prigogine von der realen Existenz der Zeit überzeugt. Er nimmt an, dass der Natur Zeitlichkeit und Geschichtlichkeit eignet, dass das Universum einen Anfang und wahrscheinlich ein Ende hat und dass sogar Elementarteilchen eine Geschichte haben: Die Zeit ist in der Natur. Die natürlichen Prozesse sind irreversibel. Die Zeit hat einen Strahl in eine bestimmte Richtung.¹

Nach buddhistischer Auffassung zum Beispiel verläuft die Zeit nicht linear, sondern zyklisch. Sangharakshita schreibt im Buch „Die drei Kleinode – Eine Einführung in den Buddhis-

mus“²: „Raum und Zeit sind keine objektiven Realitäten außerhalb des Bewusstseins, sondern Teil der Bedingungen, unter denen dieses die Dinge wahrnimmt. Wie weit auch immer man in den Raum in irgendeine Richtung vordringt, es wird stets möglich sein, noch weiter zu gehen, denn wo man auch hinget, der Geist geht mit.“ Zeit und Raum sind somit weder endlich noch linear.

Es gibt noch viele weitere Aspekte, unter denen man den Zeitbegriff betrachten könnte. Zum Beispiel den Zeitbegriff bei Kindern, den Zeitbegriff der Hopi-Indianer (sie haben keinen!), den Zeitbegriff bei neurologisch kranken Menschen, bei Tieren oder den Zeitbegriff bei verschiedenen Religionen.

2. Der Zeitbegriff Newtons – die absolute Zeit

Isaac Newton (englischer Physiker, Mathematiker, Astronom, Alchemist, Philosoph und Verwaltungsbeamter, 1643-1727), ein auf dem Gebiet der Physik absoluter Verfechter von Objektivität und Messbarkeit, meint: „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge der Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand. Sie wird

² Sangharakshita (1971) Die drei Kleinode – Eine Einführung in den Buddhismus, Delp Verlag, ISBN-10: 3768900770, Seite 76.

¹ Prigogine I. und Stenger I. (1993) Das Paradox der Zeit, Piper Verlag.

auch mit dem Namen Dauer belegt.“ Zeit ist etwas Absolutes, Vorhersagbares, an dem man Ereignisse messen und auch einordnen kann. Kann man irgendwem Punkt (Ereignis) neben seiner Raum- auch eine Zeitkoordinate geben (Zeitpunkt), dann kann man diese Punkte chronologisch ordnen. Wählt man einen beliebigen Zeitpunkt, so ist alles davor Vergangenheit, alles danach Zukunft. Alle vergangenen Ereignisse können alle zukünftigen Ereignisse prinzipiell beeinflussen. Gerade diese Festlegung macht uns diese Definition so vertraut, da unsere Kognition auf dem Einsatz von Ursache-Wirkungsbeziehungen aufbaut. Zusammenfassend gesagt, ist es für Newton möglich, jedem Objekt zwei Koordinaten, eine Raum- und eine Zeitkoordinate, zuzuordnen. Mit diesem Modell ist es möglich, die Bewegungen der Himmelskörper mit hinreichender, d.h. messbarer Genauigkeit zu beschreiben und zu prognostizieren.

3. Der Zeitbegriff Boltzmanns – keiner, weil nicht notwendig

Die Thermodynamik arbeitet mit reversiblen Prozessen, benötigt die Zeit als erklärende Komponente nicht. Wahrscheinlichkeiten bestimmen das beobachtbare Verhalten.

4. Der Zeitbegriff Machs – die absolute Zeit wird bestritten

Über zwei Jahrhunderte wurde nicht am Dogma der absoluten Zeit gerüttelt, die Messgenauigkeit verbesserte sich nicht gravierend. Erst die Vertreter der Quantenmechanik, die Newtons klassische Mechanik um die Bereiche des Mikrokosmos erweiterten, bestritten eine absolute Zeit, da sie nicht beobachtbar und damit nicht beweisbar sei. Die Kausalität der Zeit musste über Bord geworfen werden. Phänomene wie der Wellen-Teilchen Dualismus des Lichts widersetzten sich der klassischen Sichtweise von Raum-Zeit Kausalitäten. (Doppelspaltexperiment).

Das Mach'sche Prinzip (Ernst Mach, österreichischer Physiker, Philosoph und Wissenschaftstheoretiker, 1838-1916), besagt „Es gibt keinen absoluten Raum. Die Gesetze der Mechanik müssen so abgefasst werden, dass nur die Relativbewegungen aller im Weltall verteilten Massen eine Rolle spielen. Die Trägheit einer Masse ist die Reaktion auf die Wechselwirkung mit allen übrigen Massen des Universums.“

Das Mach'sche Prinzip ist rein qualitativer Natur, denn Mach drang nicht bis zu quantitativen Konsequenzen vor. Dies gelang erst Einstein, der nach eigenen Angaben stark durch die Ideen Machs beeinflusst worden war.

Bei Mach hat der Raum keinerlei eigenständige Bedeutung, es kommt nur auf Relativbewegungen der Materie an. Die von Mach geforderte Rückwirkung der Materie auf die Ursache ihrer Trägheitskräfte ist jedoch auch in Einsteins Theorie enthalten, und zwar in der Form, dass die Struktur der Raum-Zeit von der Materie beeinflusst wird.

5. Der Zeitbegriff Einsteins

Gesteigerte Messgenauigkeit und ein gänzlich verschiedenes Bild des Universums, fußend auf der speziellen Relativitätstheorie, erfordern eine neue Zeitdefinition. Zeit verliert ihren absoluten Charakter, sie „entsteht“ aus dem Zustand der Betrachterin. Ihre Geschwindigkeit, ihre Position im Raum-Zeit Kontinuum bedingen ihr Zeitmaß. Messbar wird dies durch extrem genaue Atomuhren. (H. Bürbaumer (2000) schreibt im Kapitel „Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie über Raum und Zeit“: „Im Experiment von Michelson-Morley zeigte sich, ... dass ein Lichtstrahl, der im Vergleich zu einem zur Lichtquelle ruhenden Beobachter eine Geschwindigkeit von 300000 km/s besitzt, auch von einem Beobachter, der sich mit 20000 km/s auf die Quelle zu bewegt, mit einer Geschwindigkeit von 300000 km/s gesehen wird und nicht mit einer Geschwindigkeit von 280000 km/s, wie es die Anschauung uns sagen würde.

Die Bewegung des Lichts in Raum und Zeit widerspricht daher den Gesetzen unserer Anschauung ...

Einstein konnte dieses Paradoxon durch die Annahme erklären, dass die zur Geschwindigkeitsmessung verwendeten Maßstäbe von der Relativbewegung abhängen. Eine Uhr in einem zu uns bewegten System geht für uns langsamer, ein Maßstab im bewegten System ist für uns kürzer als in einem zu uns ruhenden System. Damit erhält jedes Bezugssystem seine eigene Zeit und seinen eigenen Raum. Mathematisch zeigt sich der Unterschied zur alten Physik, dass die klassische Galilei-Transformation durch die Lorentztransformation ersetzt werden muss, die nur für den Grenzfall – im Vergleich zu Licht – sehr kleiner Geschwindigkeiten näherungsweise übereinstimmen.

Albert Einstein sagte über den Fluss der Zeit, dass er eine Illusion sei. Für ihn liegt die Gesamtheit der Ereignisse schon vor. Die Zeit dient lediglich als Parameter, um die Ereignisse in eine Beziehung zu bringen³: „Jeder Beobachter entdeckt in dem Maße, wie seine Eigenzeit abläuft gleichsam neue Ausschnitte der Raum-Zeit, die ihm als die sukzessiven Aspekte der materiellen Welt erscheinen, obwohl in Wirklichkeit die Gesamtheit der Vorgänge, die die Raum-Zeit konstituieren, dieser Erkenntnis vorangeht.“

6. Die Zeit in der Quantenmechanik

Es gibt in der Quantenmechanik keinen Operator, der die Zeit misst. Das hat die Konsequenz, dass es keine Eigenzustände zu einem Zeitoperator gibt. Diese Zustände wären zu einer Zeit und zu keiner anderen, für sie würde die Zeit nicht laufen.

H. Bürbaumer (2000)⁴ beschreibt über die Zeit in der Quantenmechanik folgendermaßen:

³ Schilpp P.A. (1979) Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher, Braunschweig 1979, S. 471

⁴ Bürbaumer H. (2000) Raum, Zeit, Wirklichkeit. HB Vlg. Wien London New York.

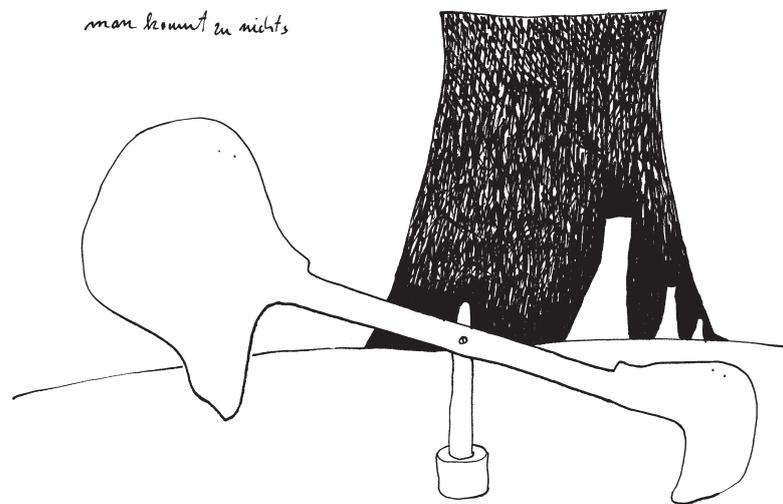
„In der Quantenmechanik spielt die Richtung der Zeit eine große Rolle, obwohl die Grundgleichungen zeit-symmetrisch sind. Denn man kann zwischen der Zukunft und der Vergangenheit eines mikrophysikalischen Objekts unterscheiden. Die Zukunft eines mikrophysikalischen Objekts ist offen. Es gibt im Falle einer Messung mehrere Möglichkeiten, für die man nur Wahrscheinlichkeiten angeben kann. Die Vergangenheit hingegen ist festgelegt, in ihr haben sich Fakten gebildet. Dies geschieht in Form so genannter Verfestigungen ...

... Erst durch die Messung wird ein bestimmter Zustand eingenommen, der Physiker sagt, die Kohärenz des Objekts geht verloren. Durch die Messung kommt es zu einer Zustandsreduktion, es kommt zu einer „Verfestigung“. Die Quantentheorie behauptet dabei jedoch nicht, dass vor der Messung mehrere Zustände möglich waren, aber nur ein bestimmter eingenommen wurde, sondern ... vor der Messung alle Zustände gleichzeitig eingenommen, es ist die Summe aller möglichen Zustände.

In der Quantenmechanik besteht daher ein Unterschied zwischen der Vergangenheit ... und der Zukunft. Die beiden sind nicht einfach umkehrbar. In der Vergangenheit gibt es Fakten ..., Die Zukunft hingegen ist offen.“

7. Zeitpfeil und Entropie

Wo kommt die Zeit aber her, war sie immer schon da, hat sie einen Anfang, eine Richtung und ein Ende? Kehrt frau an den Beginn des Universums zurück, zu einem Zustand unmittelbar nach dem Urknall, kann frau den Beginn der Zeit „lokalisieren“. Alle Teile des Universums sind gleich, die vier fundamentalen Kräfte des Weltalls sind noch gleich, die Ordnung ist maximal. Der Verlust dieser Ordnung, das Auftreten von Entropie, signalisieren den Anfang der Zeit und auch ihre „Richtung“. Überall und immer innerhalb des geschlossenen Systems Universum nimmt die Entropie zu, unterschiedliche energetische Zu-



stände gleichen sich aus, diese Prozesse sind nicht umkehrbar!

H. Bürbaumer (2000) beschreibt die Richtung der Zeit folgendermaßen:

„Wenn man die Grundgesetze der Physik betrachtet, die sich mit der Bewegung und der gegenseitigen Beeinflussung einzelner Teilchen beschäftigen, dann ist keine Richtung in der Zeit ausgezeichnet (bis auf eine kleine Ausnahme im Rahmen der schwachen Wechselwirkung). Das heißt, dass jeder Vorgang auch umgekehrt in der Zeit vor sich gehen könnte. ... Woher kommt dann der Zeitpfeil, wenn er nicht in den Grundgesetzen der Physik vorkommt? ... Ihn haben wir als ein Produkt unser vergrößernden, makroskopischen Sicht bezeichnet und aus statistischen Gründen erklärt.“

8. Der Beginn der Zeit

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt zusammen mit der beobachteten Expansion der Galaxien voraus, dass das Universum in einer Singularität begonnen hat. Eine Singularität ist ein Gebiet mit unendlich hoher Energiedichte und Krümmung der Raumzeit. Demnach verringert sich bei Zurückschreiten in der Zeit die Größe des Universums, Dichte und Temperatur steigen immer mehr an, bis das gesamte Universum in einer Singularität endet. Dies ist das Stan-

dardbild, das die Physik in den letzten Jahrzehnten für den Beginn des Universums und damit für den Beginn der Zeit entwickelt hat.

Da Zeit, Raum und Materie nach der Allgemeinen Relativitätstheorie zusammenhängen, ja eins sind – Materie ist Krümmung der Raumzeit, Raum und Zeit sind Bestandteile der 4-dimensionalen Raumzeit, wobei je nach Bezugssystem räumliche Aspekte zu zeitlichen werden können und umgekehrt – steht der Urknall nicht nur für den Beginn der Materie im Raum, sondern auch für den Beginn der Zeit. Vor dem Urknall steht nicht die Ewigkeit im Sinne einer unendlichen Zeitdauer, sondern vor dem Urknall ist überhaupt keine Zeit.

9. Die Planck Zeit

Die Zeit ist in fundamentale Einheiten eingeteilt. Diese Zeitquanten haben eine Länge, die vergleichbar ist mit der Planck-Zeit, also etwa 10^{-43} s. Diese Quantisierung der Zeit kann frau sich gut am Beispiel des Tickens einer Uhr vergegenwärtigen. Zeit ist kein kontinuierlicher Zeitfluss, sondern sie besteht aus Zeitsprüngen. Eine 100m-Läuferin bewegt sich schnappschussartig vom Start ins Ziel. Ein Elementarteilchen im Teilchenbeschleuniger springt auf der Beschleunigungsstrecke auf Planck-Längen (10^{-33} m) in Planck-

Zeiten. Bewegungen ähneln eher der Fortbewegung eines Froschs.

10. Ausblick

H. Bürbaumer (2000): „Eines der Hauptziele [der modernen Physik] ist die wissenschaftliche Erklärung der Entstehung des Universums aus dem Nichts. Es ist vorstellbar, dass durch die Kombination der beiden modernen Haupttheorien, der Quantentheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie, die Singularität am Beginn des Universums und damit die darin enthaltenen Unendlichkeiten vermieden werden können. ... Nach der Quantentheorie sind virtuelle Schwankungen, bei denen kurzzeitig aus dem Vakuum Teilchen und Antiteilchen entstehen und wieder vergehen, nicht nur möglich, sondern passieren Milliardenfach um uns herum. ... Wie kann das gesamte Weltall, das mindestens seit 10 Milliarden Jahren existiert, der Heisenbergschen Unschärferelation genügen? Indem die Gesamtenergie des Weltalls näherungsweise null ist. Sämtliche Erhaltungsgrößen wie Drehimpuls, elektrische Ladung und Gesamtenergie des Weltalls können null sein und damit wäre eine Schöpfung ohne Schöpfer prinzipiell möglich. Das Weltall wäre nach dieser Theorie eine Fluktuation des Nichts, eine Unschärfe des Nichts, die auftreten muss, da das Nichts instabil ist.“

ACKNOWLEDGEMENTS

Ein herzliches Dankeschön an H. Bürbaumer, F. Aumayr und M.O. Macqueen für Diskussionen und Inputs. | Institut für Allgemeine Physik Wiedner Hauptstrasse 8-10/134 1040 Wien email ille@iap.tuwien.ac.at www: www.ille.com

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. ILLE GEBESHUBER hat an der Technischen Universität Wien mit ausgezeichnetem Erfolg das Studium der Technischen Physik und das Doktorat der Technischen Wissenschaften abgeschlossen. Seit 1999 – nach einem PostDoc Aufenthalt am Physics Department der University of California in Santa Barbara – ist sie am Inst. für Allg. Physik an der Techn. Universität Wien tätig. Sie ist Key Researcher in am Österreichischen Kompetenzzentrum für Tribologie und Mitglied des jungen Club of Vienna.

ZEITZONEN

von Karin Seidner

Sie hatte sich schon immer zwischen und in verschiedenen Welten bewegt, aber seit ihren Kindern lebte sie nur noch in Zwischenräumen/-zeiten. Dazwischen fiel sie immer wieder aus der Zeit, aus dem Raum, aus der (Erwachsenen-) (Arbeits-)Welt, teilte nicht mehr die (Arbeits-)Zeiten, den (Tages-) (Nacht)rhythmus, den durch den Arbeitsplatz von Beschäftigten vorgegebenen.

Als Studentin hatte sie ihren eigenen Rhythmus, ihre Ausdehnung/Existenz in Zeit und Raum selbst bestimmt, doch jetzt war sie durch ihr Leben als Mutter eine durch den Raum und die Zeit gebrochene. Das Ergebnis, das „ist gleich“ auf der anderen Seite, war das den Bedürfnissen ihrer Kinder/des Tages/der Nacht unterworfenen, von den äußeren Ereignissen gelenkten, ihren Körper unterdrückenden Verhalten. Oftmals drängte sich ihr jetzt der Begriff der Maschine auf.

Oder hatte sie sich durch die Kinderaufzucht auf die rechte Gehirnhälfte reduziert? Jedenfalls passierte es ihr immer häufiger, dass sie, wenn sie kurz aus ihren Automatismen erwachte (z. B. wenn sie zufällig alleine unterwegs war), überrascht darüber war, wie fremd sie sich unter den Menschen fühlte, die plötzlich andere Moden trugen, als hätten sie die von tags zuvor schon fallengelassen und ausgetauscht, das geschah nicht nur mit Kleidung, sondern auch mit Kunst und mit Sprache. Sie wusste dann nicht mehr, wie sie sich anziehen sollte oder welche Worte sie verwenden konnte ohne lächerlich und deplaziert zu wirken. Sie wusste nicht, ob sie ein Opfer der Sucht nach Veränderung der

anderen war oder ob sie einfach wieder einmal aus dem Zeit-Raum-Kontinuum gefallen und schief zurückgerutscht war.

Überhaupt erschien es ihr, dass sie etliches nicht mehr verstand, sie vielleicht – und das war die schlimmste Vorstellung von allen – aus der Kommunikation geschleudert worden war. Hatte es nicht eine Bedeutung, wie und wohin im Raum sich die Menschen bewegten? Sollten diese Muster etwas bedeuten oder war sie nahe an einer Psychose? Monokausale Erklärungen seien nicht möglich wie z. B. das Geheimnis einer Wiese anhand eines Halmes nicht verständlich sei und psychische Störungen heute nur mithilfe chaostheoretischer Erklärungsmodelle und nicht mit Ursache-Wirkungs-Verfahren nachvollziehbar seien. So hatte sie es zumindest einmal wo gelesen oder gehört.

Arbeiten bedeute zur Selbstentfremdung fähig sein, das hatte ihr das Radio auch erzählt an einem dieser endlosen Nachmittage, an denen sie ständig auf die Uhr sah, weil sie darauf wartete, die Kinder, die gerade vom Mittagsschlaf erwacht waren, wieder ins Bett stecken zu können. Und sie hatte den Satz zuerst gar nicht verstehen können, er stand beinahe wie in Zeitlupe im Raum und sie las/hörte ihn im Geiste wieder und wieder, bis sich langsam eine Verbindung zum Wort selbst in ihrem Gehirn aufbaute und bis zu Entfremdung war es noch eine ganze Weile, mindestens bis sie dem einen Kind die Banane geschält und in Stücke geschnitten hatte.

Sie bewunderte die Menschen, die ihr Selbst anscheinend so gut kannten, dass sie wussten, wann sie sich davon