

Die Rolle der Zeit in der Kosmologie

1 Der Zeitbegriff in der Physik

Die Zeit, so scheint es, ist ein aus dem Alltag wohlvertrauter Begriff. Sie ist das, was durch Uhren gemessen und auf dem Kalender angezeigt wird. Der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft ist prägend für die Entwicklung der Welt und unseres eigenen Lebens. Dass es sich bei der Zeit um einen der schwierigsten Begriffe überhaupt handelt, wird klar, wenn man versucht, ihn streng zu fassen. Hierfür wird gemeinhin die Physik als die Wissenschaft von der Natur für zuständig erklärt. Im Laufe ihrer Entwicklung hat sich die Physik freilich von einer direkten Beschreibung der Alltagswelt weg entwickelt, hin zu einer deutlichen Abstraktion ihrer Grundlagen. Natürlich muss sich die Physik weiterhin an der Erfahrung bewähren, und Theorien müssen aufgegeben werden, wenn sie das nicht leisten. Jedoch ist der Weg von den Gleichungen zu den Phänomenen ein verschlungener, und es ist im allgemeinen nicht so, dass einer mathematischen Größe in der Theorie eine direkte beobachtbare Größe entspricht. Tatsächlich ist es so, wie insbesondere Heinrich Hertz betont hat, dass wir im Prinzip sehr unterschiedliche mathematische Beschreibungen für eine beobachtbare Größe formulieren können.

Das trifft natürlich auch auf den Zeitbegriff zu. Die grundlegenden Gleichungen der Physik enthalten in der Regel „die Zeit“, und wenn sie das nicht tun, handelt es sich in der Regel um statische Grenzfälle, in denen die Zeit keine Rolle spielt (zum Beispiel in der Elektrostatik). Der Wandel des physikalischen Zeitbegriffs ging (und geht) daher einher mit dem Wandel der physikalischen Theorien insgesamt. Werfen wir deshalb zunächst einen Blick auf diesen Wandel von den Anfängen der modernen Naturwissenschaft bei Newton bis zur heutigen Physik.¹

Konstituierend für die Newtonsche Mechanik sind die Begriffe von absolutem Raum und absoluter Zeit. In seinen *Principia* von 1687 betont Newton, dass der absolute Raum vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äuße-

¹ Für eine ausführliche Darstellung sei auf Kiefer (2008) verwiesen.

ren Gegenstand stets gleich und unbeweglich bleibe und dass die absolute (auch wahre und mathematische genannte) Zeit an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig verfließe, wie der Raum ohne Beziehung auf irgend einen äußeren Gegenstand. Raum und Zeit sind als starrer Rahmen für die Welt vorgegeben, quasi wie eine Bühne, auf der sich die physikalischen Objekte gemäß den Gesetzen der Mechanik bewegen. Durch das absolute Verfließen der Zeit lässt sich für je zwei Ereignisse objektiv angeben, ob sie gleichzeitig stattfinden oder nicht; Gleichzeitigkeit ist absolut.

Durch den absoluten Raum sei, so Newton, der Zustand der absoluten Ruhe gegeben. Allerdings lässt sich dieser Zustand durch kein Experiment feststellen. Der Grund dafür liegt in dem schon Galilei bekannten Relativitätsprinzip, nach dem alle Bewegungen, die geradlinig und gleichförmig erfolgen, äquivalent sind. (Solche Bewegungen definieren ein sogenanntes Inertialsystem.) Ein Zustand der Ruhe kann deshalb nicht von einem Zustand mit konstanter Geschwindigkeit unterschieden werden. Aus diesem Grund ist das mathematische Bild der Newtonschen Raumzeit durch einen affinen Raum (in dem Geraden ausgezeichnet werden) gegeben. Beschleunigte, also nichtinertiale Bewegungen lassen sich im Newtonschen Bild jedoch durch ihre Trägheitskräfte in Bezug auf den absoluten Raum feststellen, wie Newton selbst in seinem berühmten Eimerexperiment vor Augen geführt hat.

Das absolute Verfließen der Zeit suggeriert einen absoluten Unterschied von Vergangenheit und Zukunft, wie es auch unsere Alltagswelt nahelegt. Allerdings zeichnet der Formalismus der Newtonschen Mechanik keine Zeitrichtung aus. Der in den Gleichungen aufscheinende Zeitparameter t kann ohne weiteres durch $-t$ ersetzt werden, ohne dass dies in den Gleichungen spürbar wäre. Der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft wurde in der Physik erst durch die im 19. Jahrhundert aufkommende Thermodynamik thematisiert. Deren Zweiter Hauptsatz postuliert, dass eine Größe namens Entropie für abgeschlossene Systeme niemals abnehmen könne. Die Entropie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustands, und ihre Zunahme entspricht dem Übergang von einem unwahrscheinlicheren („geordneteren“) in einen wahrscheinlicheren („ungeordneteren“) Zustand. Sich selbst überlassen, sollte sich ein thermodynamisches System im Lauf der Zeit in einen Gleichgewichtszustand entwickeln. Ein solcher Zustand lässt jede Komplexität vermissen und ist durch wenige Parameter wie die Temperatur vollständig festgelegt. Angewandt auf das Universum als Ganzes, hat man von einer durch den Zweiten Hauptsatz erzwungenen Entwicklung hin zu einem Zustand des Wärmetods gesprochen. Es ist an dieser Stelle, wo die

Kosmologie zum ersten Mal an zentraler Stelle Einzug in die moderne Physik hält.

Mit dem Aufkommen der Elektrodynamik in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts schien sich ein Widerspruch zum Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik Newtons anzubahnen. Die grundlegenden Gleichungen - die Maxwell'schen Gleichungen - scheinen ein Bezugssystem auszuzeichnen, und zwar das System, in dem die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum den Wert c annimmt.² Das deutete auf die Existenz eines alles durchdringenden materiellen „Äthers“ hin, in bezug auf den die Maxwell-Gleichungen definiert sind. Es war Einsteins große Leistung, in seiner Speziellen Relativitätstheorie von 1905 zeigen zu können, dass das Relativitätsprinzip sehr wohl mit den Maxwell-Gleichungen in Einklang ist und dass man deshalb keinen Äther benötigt. Allerdings musste ein wichtiges Konzept der klassischen Mechanik aufgegeben werden – die absolute Gleichzeitigkeit. Im allgemeinen hängt es jetzt vom Bezugssystem ab, ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht. Zeit und Raum sind für sich genommen nicht mehr absolut, wohl aber ihre Vereinigung zu einer vierdimensionalen Raumzeit. Es ist diese „Minkowski-Raumzeit“, die den starren äußeren Rahmen für das physikalische Geschehen abgibt.

Einstein bemerkte später einmal, dass es sehr merkwürdig sei, ein Ding zu setzen, dass zwar wirke, auf das aber nicht gewirkt werden könne. Er meinte damit die absolute Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie. Das ändert sich erst, wenn die Gravitation ins Spiel kommt. Wie Einstein in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915 erkannte, ist das altbekannte Phänomen der Gravitation nichts anderes als die Geometrie von Raum und Zeit. Die vierdimensionale Raumzeit wird jetzt dynamisch und erlebt eine wechselseitige Beziehung mit der Materie und anderen Feldern. So strahlen asymmetrisch bewegte Massen Gravitationswellen aus, die das Gefüge der Raumzeit ändern und insbesondere den Uhrgang beeinflussen. Im Alltag geht der vom Ort im Gravitationsfeld abhängende Uhrgang etwa in die Funktion des Positionierungssystems GPS ein. Newtons absoluter Raum und absolute Zeit haben sich aufgelöst.

Im mikroskopischen Bereich ist die Gravitation in der Regel vernachlässigbar. Dort findet die Quantentheorie Anwendung, die sich von der klassischen Physik deutlich unterscheidet. Es gibt keine Teilchenbahnen mehr, und der zentrale Begriff ist eine Wellenfunktion in einem hochdimensionalen Konfigurationsraum, deren Bezug zu klassischen Begriffen über eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation läuft.³ Was die Zeit angeht, ist die Quantentheorie jedoch

² c beträgt ungefähr 300.000 Kilometer pro Sekunde.

³ Siehe hierzu etwa Joos et al. (2003) und Kiefer (2008).

konservativ. Die Quantenmechanik hat Newtons absolute Zeit t in ihren Formalismus unverändert übernommen. Berücksichtigt man noch die Spezielle Relativitätstheorie, so gelangt man zur Quantenfeldtheorie, derzufolge sich die dynamischen Quantenfelder auf der absolut vorgegebenen Minkowski-Raumzeit bewegen.

Somit ist der gegenwärtige Zustand der Physik bezüglich des Zeitbegriffs nicht kohärent. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt eine dynamische Raumzeit voraus; die Quantentheorie benutzt eine absolute Raumzeit. Man spricht hier auch von dem „Problem der Zeit“. Wir werden im letzten Abschnitt sehen, ob eine umfassendere Theorie einen einheitlichen Zeitbegriff gestattet.

2 Das Universum als Ganzes

Auf großen Skalen dominiert die Gravitation. Eine Theorie über das Universum als Ganzes – eine Kosmologie – muss also auf einer Theorie der Gravitation beruhen. In der Newtonschen Mechanik stößt man hier schnell an Grenzen, da ein endliches Universum in sich zusammenfielen und ein unendliches Universum der genauen Aufhebung von unendlich großen Kräften bedürfte. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie ist hingegen begrifflich angemessen. Die Welt als Ganzes wird dort durch eine vierdimensionale Raumzeit beschrieben. Die Auftrennung in Raum und Zeit ist allerdings nicht vorgegeben und auf unendlich viele Weise möglich, weshalb zunächst nicht klar ist, was man unter einer kosmischen Zeit zu verstehen hat. Hier helfen aber ein empirischer Befund und ein Postulat. Wir stellen fest, dass das Universum von uns aus gesehen in alle Richtungen etwa den gleichen Anblick bietet. Das gilt freilich nicht für unsere nächste astronomische Umgebung, sondern nur für große, eben kosmologische Entfernungen: Große Galaxienhaufen sind in etwa gleich verteilt, und die alles durchdringende kosmische Hintergrundstrahlung hat in allen Richtungen ungefähr die gleiche Temperatur. Nun ist es natürlich denkbar, dass sich dieser gleichmäßige Anblick nur von uns aus bietet, die Erde also einen besonderen Platz im Weltall einnimmt. Postuliert man jedoch, dass wir uns an keinem ungewöhnlichen Ort befinden (eine Annahme, die als Kosmologisches Prinzip bezeichnet wird), so folgt aus einem mathematischen Theorem, dass das Universum auf großen Skalen ungefähr homogen ist und in alle Richtungen den gleichen Anblick bietet, und zwar von jedem Ort aus. Natürlich gelten Homogenität und Isotropie nur näherungsweise. Andernfalls gäbe es im Universum keine Strukturen, keine Galaxien und Galaxienhaufen und keine Erde mit Lebewesen.

Wegen der Homogenität des Universums (damit ist hier der dreidimensionale Raum gemeint) lässt sich eine ausgezeichnete kosmische Zeit einführen. Schnitte konstanter Zeit führen von der vierdimensionalen Raumzeit auf dreidimensionale Räume. Die beobachtete Homogenität lässt sich nur für ganz spezielle Schnitte erreichen, die dann eben die kosmische Zeit definieren. In Bezug auf diese Schnitte und diese Zeit ist die Kosmische Hintergrundstrahlung näherungsweise isotrop.

Kosmologie ist eine empirische Wissenschaft. So weiß man schon seit vielen Jahren, dass unser Universum expandiert. Das heißt, dass sich das (approximativ) homogene Universum mit zunehmender kosmischer Zeit aufbläht. Blickt man zurück in die Vergangenheit, so muss das Universum aus einem sehr dichten und heißen Anfangszustand heraus entstanden sein, den man Urknall nennt. Man hat herausgefunden, dass das Universum ungefähr 13,75 Milliarden Jahre alt ist (in der kosmischen Zeit gemessen). Wenn man von den Strukturen absieht, ist das Universum großräumig ungefähr flach.

Seit einiger Zeit weiß man, dass das Universum *beschleunigt* expandiert, seine Expansionsgeschwindigkeit somit zunimmt. Das ist der ominösen „Dunklen Energie“ geschuldet, deren genaue Natur noch unbekannt ist. Im einfachsten Fall handelt es sich um Einsteins Kosmologische Konstante. Trifft dies zu, so wird die Beschleunigung für immer andauern, das Universum für immer expandieren und „leerer“ werden, da irgendwann keine neuen Strukturen mehr entstehen und die bestehenden ausgedünnt werden.

Lässt sich der Anfang des Universums, quasi das Geschehen am Zeitpunkt null, beschreiben? Hier stößt Einsteins Theorie an ihre Grenzen. Man kann unter allgemeinen Annahmen (zum Beispiel über die Energie der enthaltenen Materie) zeigen, dass diese Theorie unvollständig ist. Die entsprechenden „Singularitätstheoreme“ wurde von Penrose, Hawking und anderen Ende der sechziger Jahre bewiesen. Wichtige Beispiele sind die Singularitäten im Inneren der Schwarzen Löcher und am Anfang des Universums. Der Zeitpunkt null entzieht sich somit dieser Theorie.

Singularitäten können auch in der Zukunft auftreten. Falls der Ursprung der Dunklen Energie nicht in der Kosmologischen Konstante liegt, sondern in komplizierteren Feldern wie „Quintessenz“, ist es denkbar, dass etwa das Universum in endlicher Zeit unendlich groß wird oder in endlicher Zeit abrupt zum Stillstand kommt. Im ersten Fall spricht man von einem „Großen Riss“, im zweiten von einer „Großen Bremse“. In beiden Fällen verliert die kosmische Zeit ihre Bedeutung. Es ist auch möglich, dass das Universum einen Umkehrpunkt er-

reicht, schrumpft und in einem „Endknall“ endet, der ebenfalls singulär wäre und ein Ende der Zeit bedeutete.

Um verlässliche Aussagen über diese Situationen treffen zu können, benötigt man eine umfassendere Theorie. Die Geschichte der Physik lehrt, dass die Quantentheorie in einer ähnlichen Situation (die klassische Elektrodynamik betreffend) Singularitäten vermeiden kann und damit eine umfassendere Theorie darstellt. Für die Gravitation bedeutet dies, nach einer Theorie zu suchen, die Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie vereinigt – einer Theorie der Quantengravitation. Welche Konsequenzen eine solche Theorie für den Zeitbegriff nach sich zieht, ist Gegenstand des letzten Abschnitts.

3 Existiert die Zeit auf fundamentaler Ebene?

Die Existenz der Singularitätentheoreme und die sich daraus ergebende begrenzte Gültigkeit von Einsteins Theorie liefert nur eine Motivation für die Suche nach einer Quantengravitation. Tatsächlich sprechen auch andere Gründe für die Existenz einer solchen Theorie.⁴ Die Geschichte der modernen Physik belegt den Erfolg einer reduktionistischen Vorgehensweise, da sich ursprünglich getrennte Kräfte als Aspekte ein und derselben fundamentalen Wechselwirkung entpuppten. Man denke nur etwa an die erfolgreiche Vereinigung von Elektrizität, Magnetismus und Optik in den Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik. Da die Gravitation universell an alle Energieformen koppelt, und diese erfolgreich durch Quantentheorien beschrieben werden, liegt es nahe, dass in einer vereinheitlichten Theorie auch die Gravitation durch eine Quantentheorie beschrieben werden muss. Natürlich ist dieses Argument nicht zwingend, und es ist durchaus denkbar, dass sich die Gravitation als rein „emergente Wechselwirkung“ analog etwa zur Hydrodynamik herausstellt, die nicht separat quantisiert werden kann. Dennoch ist die Suche nach einer Quantengravitation ein wichtiger Schritt zu einem fundamentalen Verständnis der Gravitation.

Da es bisher keinen empirischen Anhaltspunkt für eine solche Theorie gibt, existieren nur Ansätze, die durch begriffliche und mathematische Gründe motiviert sind. Ich will mich hier auf einen konservativen Zugang beschränken, in dem die Auswirkungen der Quantisierung auf den Zeitbegriff besonders klar hervortreten.⁵ Dieser Zugang ist die Quantengeometrodynamik. Er lässt sich am

⁴ Vgl. Kiefer (2012).

⁵ Eine ausführliche Darstellung der wichtigsten Zugänge bietet Kiefer (2012); vgl. auch Kiefer (2008) für eine allgemeinverständliche Darstellung.

einsichtigsten durch eine Vorgehensweise begründen, die analog zur Auffindung der Schrödinger-Gleichung durch Erwin Schrödinger 1926 verläuft.

Die einzige Annahme bei dieser Vorgehensweise ist die unbeschränkte Gültigkeit der Quantentheorie, in dem Sinne, dass das Superpositionsprinzip⁶ auch bei Anwesenheit von Gravitationsfeldern gilt. Man kann deshalb im Geiste Schrödingers nach einer quantentheoretischen Wellengleichung suchen, die im klassischen Grenzfall wieder die Einstein-Gleichungen ergibt. Die resultierende Gleichung heißt Wheeler-DeWitt-Gleichung, benannt nach den US-amerikanischen Physikern John Wheeler und Bryce DeWitt.⁷ Diese Gleichung hat die erstaunliche Eigenschaft, dass sie keinen Zeitparameter mehr enthält. Es handelt sich um eine statische Gleichung, in der nur die Geometrie des Raumes, nicht der Raumzeit erscheint.⁸

Wie lässt sich dies verstehen? In der gewöhnlichen Quantenmechanik ist der Begriff der Teilchenbahn verschwunden. An seine Stelle treten Wellenfunktionen, die mit der Wahrscheinlichkeit verbunden werden, bei einer Messung zum Beispiel den Ort eines „Teilchens“ zu finden. Da die Quantenmechanik jedoch Newtons absolute Zeit t unverändert übernommen hat, erscheint dieser Parameter in der Schrödinger-Gleichung; die Wellenfunktionen entwickeln sich in der Zeit. In Einsteins Theorie gibt es von Anfang an keine äußere Zeit mehr. Der klassischen Bahn eines Teilchens entspricht dort die gesamte Raumzeit, interpretiert als Abfolge von dreidimensionalen Räumen. Deshalb verschwindet bei der Quantisierung die Raumzeit, und man verbleibt mit einer Wellenfunktion, die nur auf dem Raum definiert ist. So verblüffend diese Konsequenz auf den ersten Blick ist, so zwingend erscheint sie im Lichte der üblichen Quantentheorie.

Das oben erwähnte „Problem der Zeit“ wird von der Quantengravitation also dadurch gelöst, dass es gar keine Zeit mehr gibt. Da das Argument für das Verschwinden der Zeit sehr allgemein ist, gilt es auch für andere Zugänge zur Quantengravitation und ist nicht auf die Wheeler-DeWitt-Gleichung beschränkt. Die Abwesenheit der Zeit führt dazu, dass die Singularitäten der klassischen Theorie verschwinden, zumindest in einfachen Modellen.

Von der Perspektive der Quantengravitation aus betrachtet, ist die Welt zeitlos, sie *ist* einfach nur und entwickelt sich nicht. Steht dies nicht im Widerspruch zu unserer täglichen Anschauung? Hier erlaubt der Formalismus eine

⁶ Dieses Prinzip besagt, dass bei zwei physikalisch erlaubten Zuständen auch die Summe ein erlaubter Zustand ist, vgl. Joos et al. (2003).

⁷ Die beiden Entdecker selbst sprachen von der Einstein-Schrödinger-Gleichung.

⁸ Vgl. Kiefer (2009).

klare Antwort. Die Situation ähnelt der einer Buchlektüre. Das Buch selbst ist „zeitlos“; alle Sätze sind von vornherein vorhanden. Dennoch ergibt sich beim Lesen die Illusion, dass die Zeit vergeht, umso mehr, je spannender das Buch ist. Im Formalismus der Gleichungen zeigt sich dies in der Existenz unterschiedlicher Freiheitsgrade und Skalen: der Energieskala der Gravitation und der des „Beobachters“. Dabei spielt der Prozess der Dekohärenz – der irreversiblen Entstehung klassischer Eigenschaften durch Wechselwirkung mit irrelevanten Freiheitsgraden – eine zentrale Rolle. Die so wiedergefundene Zeit ist für die Beschreibung unseres Universums relevant. Vom Standpunkt der Quantengravitation aus handelt es sich freilich um eine Illusion.

In der Physik spielt nicht nur die Zeit als Parameter eine Rolle, sondern auch die empirisch beobachtete *Richtung* der Zeit, der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft.⁹ Diese beobachtete Irreversibilität erscheint zunächst als Rätsel, da die zugrunde liegenden mikroskopischen Gesetze reversibel sind, also keine Zeitrichtung vor der anderen auszeichnen. Sie lässt sich nur begründen, wenn es eine ausgezeichnete kosmologische Randbedingung gibt, einen Zustand sehr niedriger Entropie zu Beginn des Universums. Gerade unter Berücksichtigung der Gravitation ist diese Entropie ungewöhnlich niedrig, wie sich leicht abschätzen lässt.¹⁰

Wie erscheint dieses Problem im Licht der zeitlosen Quantengravitation? Die Wheeler-DeWitt-Gleichung, wie auch Gleichungen anderer Zugänge, zeigt eine klare Asymmetrie in Bezug auf die Größe des Universums: sie ist von einfacher Gestalt bei kleiner Größe und wird bei zunehmender Ausdehnung komplizierter. Das lässt eine Anfangsbedingung niedriger Entropie als natürlich erscheinen, wenngleich die Details hierzu noch nicht geklärt sind. Die Expansion des Universums wäre in diesem Bild eine Tautologie, da sie direkt durch die Zunahme der Entropie definiert wäre, die nicht in der Zeit erfolgt, sondern die Zeitrichtung erst definiert.¹¹

Die obigen Betrachtungen beruhen auf dem Universum, das wir beobachten, einem Universum, das auf großen Skalen ungefähr homogen und isotrop ist. In den letzten Jahren wurde darüber spekuliert, ob dieses Universum nicht Teil eines viel größeren inhomogenen Universums ist, das man auch Multiversum nennt.¹² Ob und wie sich das Problem der Zeitrichtung in einem solchen Rahmen behandeln lässt, ist freilich alles andere als klar. Insgesamt bleibt jedenfalls

⁹ Siehe hierzu insbesondere Zeh (2007).

¹⁰ Penrose (2009).

¹¹ Zeh (2007).

¹² Siehe z.B. Carr (2007).

festzuhalten, dass der physikalische Zeitbegriff sich sehr weit von dem entfernt hat, was man aus dem Alltag als Zeit zu kennen glaubt.

Literatur

Carr (2007): Bernard J. Carr (Hg.), *Universe or Multiverse?*. Cambridge.

Joos et al. (2003): Erich Joos, Heinz-Dieter Zeh, Claus Kiefer, Domenico Giulini, Joachim Kupsch und Ion-Olimpiu Stamatescu, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Zweite Auflage. Berlin.

Kiefer (2008): Claus Kiefer, *Der Quantenkosmos*. Frankfurt am Main.

Kiefer (2009): Claus Kiefer, „Does time exist in quantum gravity?“. Online: <http://arxiv.org/abs/0909.3767>.

Kiefer (2012): Claus Kiefer, *Quantum Gravity*. Dritte Auflage. Oxford.

Penrose (2009): Roger Penrose, „Black holes, quantum theory and cosmology“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 174, Artikelnummer 012001. Bristol.

Zeh (2007): Heinz-Dieter Zeh, *The physical basis of the direction of time*. Fünfte Auflage. Berlin.

Mensch und Zeit

Hartung, G. (Hrsg.)

2015, VI, 292 S. 16 Abb., 14 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-05379-6