

# Und schließlich ist doch alles relativ

Ungelöste Fragen zum Thema Zeit in der Physik

Tanja Traxler

**E**in Astronaut erreicht – Wurmloch und Galaxien durchquerend – gerade noch rechtzeitig das Sterbebett seiner Tochter. Sie ist mittlerweile eine Greisin, er hingegen durch extreme Geschwindigkeiten und Gravitationskräfte viel weniger gealtert – die Relativität der Zeit ist nicht erst seit dem jüngsten Science-Fiction-Epos *Interstellar* immer wieder der Stoff, aus dem Hollywood gemacht ist.

In der physikalischen Konzeption der Zeit hat die von Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts formulierte Relativitätstheorie ein radikales Umdenken bewirkt, das über die Physik hinaus von Bedeutung ist. Die Zeit ist relativ – was wie ein banaler Allgemeinplatz klingt, ist eine zentrale Aussage der Theorie. Doch was ist ihr physikalischer Gehalt?

Physikalisch gesehen ist die Zeit das, was von Uhren gemessen wird. In der Vorstellung einer absoluten Zeit, die vor Einstein das physikalische Denken bestimmt hat, spielt es keine Rolle, wo die Zeit gemessen wird: Eine Sekunde dauert immer gleich lange – auf der Erde, auf dem Sirius, in Ruhe oder in Bewegung.

## Bewegte Uhren ...

Diese Auffassung scheint zwar vernünftig, die Relativitätstheorie zeigt aber, dass sie falsch ist. „It came to me that time was suspect“, wird Einstein von N. David Mermin im Buch *It's About Time*, einem der wichtigsten Werke über die Relativitätstheorie, zitiert.

Eine der Ausgangsfragen der Speziellen Relativitätstheorie – die sich Einstein auf dem Fahrrad gestellt haben soll – ist: Wie würde die Welt aussehen, wenn man sich mit der Geschwindigkeit eines Lichtstrahls bewegt?

Einstein stellte fest, dass bewegten Beobachtern Längen verkürzt und Zeiten gedehnt erscheinen. Diese sogenannte Zeitdilatation lässt sich auf die einfache Formel bringen: Bewegte Uhren gehen langsamer. Bei Alltagsgeschwindigkeiten lässt sich dieser Effekt zwar kaum bemerken, aber wenn ein Mensch mit rund 540.000.000 km/h unterwegs wäre – rund die Hälfte der Lichtgeschwindigkeit – wäre er nach einem Jahr 49 Tage jünger als sein Zwillingsbruder. Mermin, Emeritus der Cornell

University im Bundesstaat New York, schreibt: „Was sie so faszinierend macht, ist, dass die Relativitätstheorie enthüllt, dass die Natur der Zeit sich erschreckend von dem unterscheidet, was man zuvor als selbstverständlich annahm.“ Warum die Relativität der Zeit so lange unentdeckt blieb, obwohl sie ein Gedanke ist, der unser Weltbild massiv verändert, erklärt Mermin damit, dass sie in Alltagsphänomenen kaum beobachtet werden kann.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie entwarf Einstein zudem die Vorstellung, dass nicht nur die Geschwindigkeit das Zeitmaß verändert, sondern auch die Gravitationskraft eine Rolle dabei spielt: In Einsteins Verständnis müssen Raum und Zeit symmetrisch betrachtet werden: im Rahmen einer vierdimensionalen Raum-Zeit. Die Zeit ist damit nicht nur ein Parameter, der mit einer Uhr gemessen wird, sondern wird selbst zur Koordinatenachse.

Obwohl diese Überlegungen sehr theoretisch erscheinen, haben sie beobachtbare Konsequenzen und sind vielfach experimentell bestätigt: In der Ablenkung von Lichtstrahlen bei einer Sonnenfinsternis, in der Satellitennavigation oder bei GPS – ohne relativistische Berechnungen würde dieses nicht funktionieren.

Dennoch ist das Zeitverständnis der Physik mit der Relativitätstheorie nicht besiegt. Neben der Relativität gibt es eine zweite große Theorie der modernen Physik: die Quantenmechanik.

In der immer noch ausstehenden Vereinheitlichung dieser beiden Theorien ist es gerade das Konzept der Zeit, das die Physiker vor Probleme stellt. Im Gegensatz zur Relativitätstheorie spielt die Zeit in der Quantenmechanik eine untergeordnete Rolle gegenüber dem Raum.

## ... gehen langsamer

In das Hauptgesetz der Theorie, die Schrödingergleichung, geht die Zeit nur als Parameter ein, in der sogenannten stationären Schrödingergleichung, mit der etwa Elektronen im Atom beschrieben werden können, kommt die Zeit nicht einmal vor.

Die Zeit als Parameter in der einen Theorie, als Koordinatenachse in der anderen – das geht nicht zusammen, und entsprechend schwierig ist die Suche nach einer „theory of everything“, für die momentan etwa Stringtheorie und Quantengravitation gegeneinander antreten.

Warum es so schwierig ist, die Zeit quantenmechanisch zu fassen, erklärt Mermin damit, dass Zeit „ein makroskopisches Konzept ist“ – wir messen sie mit makroskopischen Uhren. Die Effekte der Quantenmechanik sind hingegen vor allem im mikroskopischen Bereich sichtbar.

Ist die Zeit also die wesentliche ungelöste Frage, die noch im Weg steht, um eine physikalische Gesamttheorie zu finden? Mermin: „Vielleicht geht es dabei um die Zeit, vielleicht um den Raum, wahrscheinlich um die Frage, was wir unter Realität verstehen.“

Folgt man *Interstellar*, gibt es nur einen Weg zu den entscheidenden Einsichten, um Relativitätstheorie und Quantenmechanik zu vereinen und damit auch das Geheimnis der Zeit zu lüften: die Reise durch das Wurmloch. **Buchtipps:** N. David Mermin, „It's About Time“, Princeton University Press 2005, erscheint nächstes Jahr auf Deutsch unter dem Titel „Es ist Zeit“ beim Springer-Verlag.

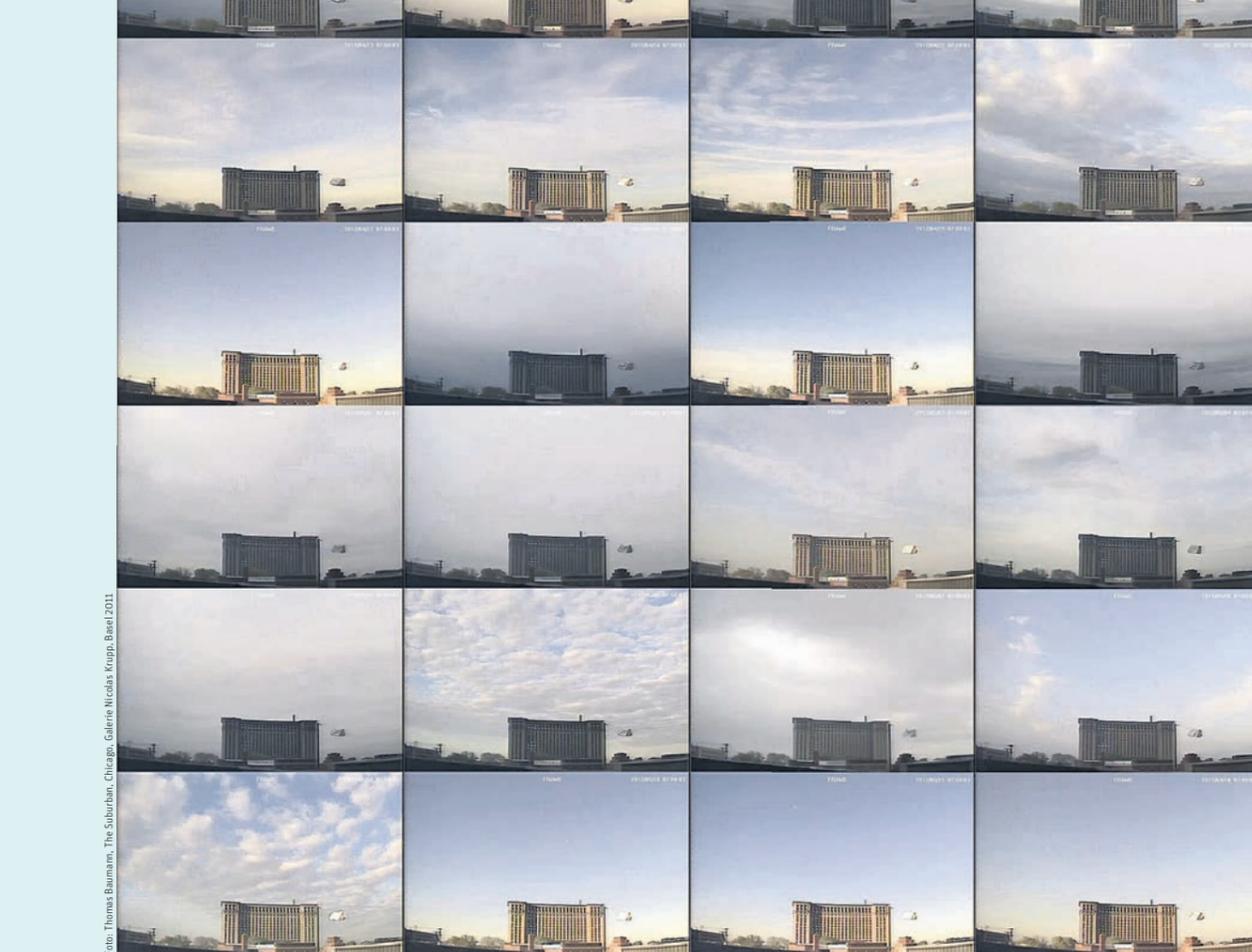


Foto: Thomas Baumann, The Suburban, Chicago, Galerie Nicolas Krupp, Basel 2011

„The Constitution of Liberty“: Marcel Duchamp gab 1918 seiner Schwester als Hochzeitsgeschenk eine Telegrammanweisung, sie möge ein Geometriebuch an ihrem Balkon befestigen, um so die Gesetze der Geometrie mit den Gesetzen der Natur zu prüfen – „The Unlucky Readymade“. Thomas Baumann griff diese Idee 2011 auf und konfrontierte in Detroit das Buch „Die Verfassung der Freiheit“ von Friedrich August Hayek mit den Bedingungen der US-amerikanischen Stadt nach dem Zusammenbruch der Autoindustrie. 14 Monate lang hing das Buch Tag und Nacht – gefilmt von einer Videokamera – in Sichtweite der aufgelaassenen, leeren Central Station, die mittlerweile Ikone und Wahrzeichen für den Verfall der Stadt geworden ist.



# Das große Knirschen zwischen Urknall und Urknall

Das Ende der Zeit aus physikalischer Sicht

Tanja Traxler

**A**m Anfang war der Urknall. Darüber, wie das Universum und damit die Zeit ihren Anfang genommen haben, gibt es in der Wissenschaft mit der Big-Bang-Theorie eine recht un widersprochene Ansicht. Wie die Zeit möglicherweise zu Ende geht, ist dagegen umstritten.

Mindestens sieben Thesen versuchen, den Untergang des Universums physikalisch zu fassen. Und die klingen alle ziemlich groß: Big Crunch, Big Whimper, Big Rip, Big Freeze, Big Brake, Big Lurch und Big Bounce.

All diese Theorien haben viel mit dem Urknall zu tun: Dass sich das Universum seit dem Big Bang ausdehnt – und zwar mit wachsender Geschwindigkeit –, scheint durch Messungen kosmischer Strahlung gesichert. 2011 wurde dafür der Nobelpreis für Physik vergeben. Der Schwung des Urknalls treibt das Universum also auseinander. Die Schwerkraft, die auf die Materie wirkt, hält es aber zusammen – je nachdem, welche dieser Kräfte als die stärkere hervorgeht, entscheidet, wie sich das Universum entwickelt und ob und wie die Zeit zu Ende geht.

Glaut man der Relativitätstheorie, siegt die Schwerkraft und hält das Universum schließlich davon ab, sich weiter auszudehnen. Die Zeit endet dann in sogenannten Singularitäten. Das sind Momente, in denen die Materie das Zentrum eines Schwarzen Loches erreicht oder das Universum in einem Big Crunch kollabiert.

## Beliebtes Wimmern

Diese Theorie des großen „Knirschens“ verliert aber zunehmend an Anhängern. Jochen Schieck, Direktor des ÖAW-Instituts für Hochenergiephysik, geht davon aus, dass die sogenannte Dunkle Energie eine entscheidende Rolle spielen könnte. Es handelt sich dabei um eine hypothetische Form der Energie, mit der die beschleunigte Ausdehnung des Universums erklärt werden soll.

Auf die Hypothese der Dunklen Energie gestützt, herrscht momentan unter Physikern die Meinung vor, dass sich das Universum weiter ausdehnt – vorerst zumindest. Der Untergang mit den meisten Anhängern ist derzeit wohl Big Whimper. In diesem „Großen Wimmern“ stirbt das Universum

einen Kältetod: In seiner ständigen Ausdehnung verliert es zunehmend Energie. Was bleibt, klingt ernüchternd: Schwarze Löcher, Kälte und Dunkelheit.

Dabei gibt es kein scharfes Ende der Zeit, aber sie wird zunehmend bedeutungslos – das Universum verändert sich derart, dass eine Definition von Zeit nicht mehr sinnvoll möglich ist.

## Am Ende fliegen die Fetzen

Spektakulärer ist der Big Rip: Das Universum dehnt sich weiter aus und reißt sich schließlich selbst in Stücke. Selbst Atome werden dabei zerlegt, und so hört auch die Zeit auf – in schätzungsweise 20 Milliarden Jahren.

Wesentlich früher könnte uns allerdings der Big Lurch bevorstehen: Schon in neun Millionen Jahren könnte sich die Materie in einem enormen „Taumel“ verlieren, der möglicherweise auch das Ende der Zeit bedeutet.

Eine gemäßigtere Form des Untergangs ist der Big Freeze. Dabei füllt sich das Universum mit Phantomenergie und erreicht unendliche Dichte, auch wenn es nur endlich ausgedehnt ist. Die zurückbleibende Materie steckt fest, und die Zeit steht still.

Zum Stillstand kommt es auch im Big Brake: Die Dunkle Energie könnte aufhören, das Universum in seiner Ausdehnung anzutreiben, sondern es im Gegenteil abbremsen. Obwohl dabei einige physikalische Größen erhalten bleiben könnten, hätte das „Große Bremsen“ „unglückliche Konsequenzen für die Zeit“, schreibt der Wissenschaftsredakteur George Musser in seinem 2010 im *Scientific American* erschienenen Artikel „Could Time End?“.

Statt eines natürlichen Todes könnte unser Universum auch einem Unfall zum Opfer fallen, wenn sich Paul Steinhardts Modell eines „ekpyrotischen Universums“ bewahrheitet: Was wir als Urknall deuten, war demnach eine Kollision mit einem Nachbaruniversum – und Derartiges könnte sich demnächst wiederholen.

Eine gewisse Hoffnung im Moment der Apokalypse verheißt der Big Bounce. Sobald das Universum eine finale Ausdehnung erreicht hat, könnte die Schwerkraft überhandnehmen und dazu führen, dass sich das Universum wieder zusammenzieht – bis zum nächsten Urknall.

# Sein und Zeit und niemals letzte Erklärungen

Für Philosophen war eine Erklärung der Zeit, derer man so schwer habhaft wurde, schon immer ein logisches Betätigungsfeld. Sie wollten ihr Wesen begreifen oder analysierten ihre Phänomene im Bewusstsein. – Ein kleiner Streifzug durch die Ideen großer Zeit-Denker.

Alois Puhhösel

**W**as also ist die Zeit? Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich's, will ich's aber einem Fragenden erklären, weiß ich's nicht.“ Eines der berühmtesten Zitate von Augustinus deutet darauf hin, warum Zeit in der Philosophie eine so große Rolle spielt; warum sie geradezu prädestiniert dazu ist, dass man sich immer wieder Gedanken um sie macht. Man wird zu keiner finalen, alle Aspekte umfassenden Definition kommen, egal wie sehr wir unter Realität verstehen.“

Folgt man *Interstellar*, gibt es nur einen Weg zu den entscheidenden Einsichten, um Relativitätstheorie und Quantenmechanik zu vereinen und damit auch das Geheimnis der Zeit zu lüften: die Reise durch das Wurmloch. **Buchtipps:** N. David Mermin, „It's About Time“, Princeton University Press 2005, erscheint nächstes Jahr auf Deutsch unter dem Titel „Es ist Zeit“ beim Springer-Verlag.

Augustinus' Ansatz erwies sich bis ins 20. Jahrhundert als fruchtbar. Edmund Husserl überlegte, wie die Phänomene im Bewusstsein zeitlich Gestalt annehmen. Wenn man eine Melodie hört oder ein Buch liest – für Husserl sind das „Zeitobjekte“ –, spielen Erinnerungs- und Erwartungsfunktionen eine Rolle. Man muss sich an den vergangenen Ton eines Liedes erinnern und den kommenden Ton in gewisser Weise erwarten, damit ein Bewusstsein für die Melodie entstehen kann.

## Die Existenz und die Essenz

Heidegger, wie Husserl ein Phänomenologe, stellte den Tod – er nannte ihn „die äußerste Möglichkeit“ – in den Mittelpunkt seiner Zeitbetrachtung. Das Leben von Tod aus betrachtend, sah er eine jeweilige Sorge des Menschen um sich selbst im Vordergrund. Emanuel Levinas, von beiden Denkern beeinflusst, gab der Zeit hingegen eine ethisch-religiöse Bedeutung. Sie ziehe eine Grenze zwischen Diesseits und Jenseits. „Die Erfahrung des Menschen, die für ihn et was absolut anderes als das eigene Selbst ist, weil sie die Freiheit des anderen Menschen mit einschließt, ließen ihn Tugenden wie Geduld, Hoffnung, Verantwortung hervorheben“, so Brinnich.

Die Phänomenologie schuf einen großen Gegenentwurf zur langen Tradition der essenziellistischen Philosophen von Aristoteles bis Immanuel Kant, die nach dem Wesen der Dinge fragten. Die Frage nach dem Wesen der Zeit wurde von neuen abgelöst, so: Was bedeutet es für unser Leben, dass Zeit für uns selbstverständlich ist, wir aber nur begrenzte Zeit haben? Jean-Paul Sartre hätte gesagt, die Existenz geht der Essenz voraus, nicht umgekehrt.



Den antiken Philosophen Aristoteles führte die Schwierigkeit, das Wesen der Zeit dingfest zu machen, zum Ansatz, sie an die Wahrnehmung von Veränderung zu knüpfen. Für ihn war Zeit, das Gezählte an der Bewegung.“ Ob Zeit auch unabhängig von der Wahrnehmung möglich sei, lässt er offen. Kant, der als meistrezitierter Philosoph gilt, festigte seine Vorstellungen von Zeit unter dem Eindruck der Physik Isaac Newtons. Der britische Naturwissenschaftler setzte Raum und Zeit absolut, machte sie zu leeren Gefäßen, zu Containern, die von den Dingen der Welt und unabhängig von der Betrachtung des Men-

schen gefüllt wurden. Sein Gegenspieler Gottfried Wilhelm Leibniz hob dagegen einen relativen Charakter von Zeit hervor – wofür er nach Albert Einsteins Relativitätstheorie zu neuem Ansehen kam.

Kant bezog eine Gegenposition zu Newton, erklären Brinnich und Schaller. Kant versuchte zu zeigen, dass Zeit und Raum nur die Art und Weise ist, wie wir erfahren. Es ist ein Begriff, der vor jeder Erfahrung anzusetzen ist, indem er bereits einfache Wahrnehmung betrifft. Was nicht zeitlich wahrzunehmen, ist unmöglich. Raum und Zeit bilden die Grenze dessen, was

Menschen überhaupt erkennen können. Hegel wird der Vorstellung der Zeit später wieder Ethik und Zielgerichtetheit mitgeben. Die Musik, die auf andere Weise in der Zeit ist, als etwa ein Bild, das man betrachtet, wurde im 19. Jahrhundert gerne als Sprache der Innerlichkeit, des Gemüts aufgefasst. Arthur Schopenhauer machte sie zur „Sprache des Willens“. Die Abfolge von Glück und Melancholie wird weniger mit einer räumlichen, sehr wohl aber mit einer zeitlichen Vorstellung verbunden. Allerdings: Wenn wir



Das Fahrrad spielte in Einsteins Theorie keine geringe Rolle. Foto: Reuters/Ho

## „Polako, entspanne dich!“

Schön langsam!“, sagt die Nachbarin, als ich die Straße hinunterlaufe. „Nur mit der Ruhe!“, meint der Kellner, als ich nach Geld krame. „Lass dir Zeit!“, rät der Polizist, der mich beim Parken beobachtet. „Polako, samo polako!“ ist wohl der häufigste Ratschlag im bosnischen Alltag. Man kann ihn auch mit „Entspanne dich!“ oder „Es ist alles gut“ übersetzen. Jedenfalls beruht er auf der Annahme, dass es besser ist, wenn man alles ohne Eile tut.



Nur Zeit ermöglicht diese Langsamkeit. „Wir können uns nächste Woche auf jeden Fall treffen und Kaffee trinken gehen“, schreibt mir ein Bekannter. „Ich bin auf jeden Fall dafür, mit Ihnen einen Kaffee zu trinken. Ich habe am Mittwoch und Donnerstag jede Menge Zeit!“, lautet das nächste Mail. „Was das Kaffeetrinken angeht: Das Einzige, was wir hier in Bosnien im Überfluss haben, ist Zeit, sodass ich sehr gerne mit Ihnen Kaffee trinken würde“, stellt er nochmals fest. Adelheid Wölf