

# UND IMMER WIEDER SPUKT DIE ZEIT

Die Zeit ist ein seltsames Phänomen. Man kann sie messen und doch fast nicht fassen. Gibt es sie überhaupt? Und was haben Zeitreisen mit Physik zu tun?

TEXT Florian Meyer

lierte, waren Zeitreisen oft ein Thema. Einen Anstoss zu einer wissenschaftlichen Diskussion gab der Logiker Kurt Gödel Ende der 1940er Jahre: Er konnte beweisen, dass Zeitreisen theoretisch möglich sind. Unter bestimmten Bedingungen lässt die allgemeine Relativitätstheorie geschlossene, zeitartige Kurven zu. Die Zeit wird in dieser Theorie von der Geometrie her begriffen, sodass Raum und Zeit – im Unterschied zur klassischen Physik – nicht unabhängig voneinander sind. Man kann sich die Raumzeit wie eine Murmelbahn vorstellen: Ähnlich wie die Murmeln in den Rillen abwärtsrollen, umkreisen die Planeten die Sonne auf der Bahn, die ihnen die Form der Raumzeit vorgibt.

Das «Gödel-Universum» enthält nun Teile, deren Geometrie so stark gekrümmt ist, dass sich die Raumzeit-Kurven bis zu ihrem Ausgangspunkt zurückbiegen und schliessen. Auf diese Weise könnte die Raumzeit die Form eines kreisartigen Donuts annehmen. Raumfahrende, die sich mit einer stark beschleunigten Rakete darauf bewegten, kämen irgendwann zum Punkt zurück, an dem sie «schon einmal waren» und den es «schon einmal gab». Dort könnten sie theoretisch sich selber begegnen oder ihre eigene Vergangenheit wiederholen.

Niemand behauptet ernsthaft, dass man in naher Zukunft solche Zeitmaschinen bauen kann. Diese Rakete müsste eine Spitzengeschwindigkeit erzielen, die sehr nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommt. Technisch geht das nicht, sagt Renato Renner, ETH-Professor für Theoretische Physik: «Die Relativitätstheorie erlaubt grundsätzlich solche zeitartigen Schlaufen. In Berechnungen erweisen sich viele dieser Schlaufen als nicht passierbar. Ein Raumfahrer müsste mehrere Jahre lang eine Beschleu- >

**E**rinnern Sie sich an Marty McFly? Nicht mehr oder noch nicht? Marty McFly war der Held der Science-Fiction-Filmreihe «Zurück in die Zukunft», die in den 1980er Jahren die Kinos füllte. Darin reist er mit einer Zeitmaschine aus dem Jahr 1985 zurück ins Jahr 1955. Damals verliebten sich seine Eltern ineinander. Als Marty selber in die Handlung eingreift, läuft er Gefahr, dass sich seine Eltern nicht mehr verlieben und er am Ende gar nicht geboren wird. Wie aber kann er in die Vergangenheit reisen und den Lauf der Dinge verändern, wenn er gar nicht geboren wird?

Aus der seltsamen Abfolge der Ereignisse bezieht der Film seine Komik. Im Prinzip spielt der Film mit einem Gedankenexperiment, das als «Grossvaterparadoxon» bekannt ist: Dabei reist jemand in die Vergangenheit und tötet den eigenen Grossvater, bevor dieser seine Kinder zeugt. Damit verhindert die zeitreisende Person auch

die eigene Geburt. Folglich könnte sie ihren Grossvater gar nicht töten.

Für einen Philosophen und Physiker wie Norman Sieroka, der als Privatdozent an der ETH ein Buch über die Philosophie der Zeit schrieb, drücken die Beschreibungen von Zeitreisen jeweils eine bestimmte Vorstellung davon aus, in welcher Form die Zeit erscheinen kann: «Ist jemand überzeugt, dass – quasi per Definition – Vergangenes nicht mehr existiert und Zukünftiges noch nicht, dann hat das in der Regel auch Konsequenzen dafür, was diese Person physikalisch für möglich hält», sagt er, «denn Zeitreisen scheinen ausgeschlossen, wenn die Ziele der Reise in Vergangenheit und Zukunft gar nicht existieren.»

## Die Zeitmaschine

Seit sich die Science-Fiction im 19. Jahrhundert – parallel zum Aufstieg von Industrie, Technik und Naturwissenschaften – als Genre etab-

nigung aushalten, die viel grösser ist als die Erdanziehung. Das ist undenkbar. Das wird in der Science-Fiction zum Teil überhöht.»

Gödel ging es nicht um Science-Fiction. Der Sinn der Gedankenexperimente liegt darin, dass man ungeklärte und schwer verständliche theoretische Sachverhalte deutlich zu Tage fördern und diskutieren kann. In diesem Sinne stellen die Überlegungen über Zeitreisen «nützliche Fiktionen» dar. Gödels Modell verdeutlicht, dass man die Zeit der Relativitätstheorie weder mit der subjektiv erlebten Zeit noch mit der Zeit der klassischen Physik verwechseln sollte. In beiden Fällen hat die Welt eine objektive, überall gleiche, von Menschen und Gegenständen unabhängige Zeit als übergeordnetes Mass. Im «Gödel-Universum» gibt es keine solche allumfassende, absolute Zeit – und die Beschreibung einer Zeitreise in die Vergangenheit war sein Mittel, um dies aufzuzeigen. Er glaubte nicht, dass die Vergangenheit tatsächlich so existiert, dass man sie besuchen könnte.

Die Frage ist, ob das Universum eine abgeschlossene Ganzheit darstellt und die Zeit eine äussere Grösse ist, in der sich die Dinge und Ereignisse wie in einer Kiste anordnen lassen. Sie entsteht, weil man in der Physik Objekte, seien dies nun ganze Sonnensysteme, einzelne Atome oder auch Uhren, als Systeme betrachtet, die eine Umgebung haben. Das Universum ist zwar auch ein physikalisches System, aber hat es eine Umgebung?

### Schlüssel zur neuen Physik

Wie Raum und Schwerkraft gehört Zeit zu den Grundbegriffen, die jede physikalische Theorie berücksichtigen muss, wenn sie die reale Welt erklären

**Ein Phänomen** – Zeit ist eine so grundlegende Dimension des Lebens, dass sie in vielen, auch rätselhaften Erscheinungsformen auftritt.



soll. Typischerweise ist die physikalische Zeit – im Unterschied zur erlebten Zeit – eine Zeitform, die eine Uhr misst und anzeigt. Die Zeit der Uhren ist in der klassischen Physik aber Teil der Umgebung und damit im Verhältnis zum System eine äussere Zeit. Die grossen Theorien der modernen Physik, Relativitätstheorie und Quantenmechanik, haben dieses Zeitverständnis auf je eigene Weise ins Wanken gebracht. Zum Teil widersprechen sie sich aber grundlegend. Deshalb sei die Zeit, so Renner, eine Schlüsselgrösse, um die beiden Theorien zu vereinigen. Er versucht es, indem er jene Eigenschaften der Zeit sucht, die unabhängig von den Theorien sind.

Zum Beispiel, so Renner, könnte man das Grossvaterparadoxon, das einen Sachverhalt der Relativitätstheorie illustriert, auflösen, indem man es mit dem bekanntesten Paradoxon der Quantenmechanik verbindet: nämlich mit der «Schrödinger-Katze», die sowohl tot als auch lebendig sein kann. In dieser Betrachtung wäre der Grossvater sowohl tot als auch lebendig. Das könnte funktionieren, wenn die zeitartige Schlaufe, durch die sich die Zeitreisende bewegt, eine Acht bildet, de-

ren Oberfläche – wie ein Möbiusband – zwei Seiten hat, die fliegend ineinander übergehen, sodass man einmal «oben» und einmal «unten» wäre.

Knifflig ist die Vereinigung, weil Zeit in der Quantenmechanik – anders als in der Relativitätstheorie – ein eigenes Konzept ist: Mit Quantenmechanik beschreibt man, wie sich Zustände der Materie, zum Beispiel von Molekülen und Atomen, in der Zeit verändern. Die Zeit ist demnach eine gegebene Rahmenbedingung der Veränderungen. Ihr theoretischer Status hingegen ist unklar.

Eine wichtige Rolle spielt für Renner die Zeitmessung. «Wenn wir eine Uhr in beiden Theorien modellieren, dann kann sie uns zu einem gemeinsamen Zeitkonzept hinführen – denn die Uhr ist ja dieselbe.» Renner widmet sich den theoretischen Grundlagen von Uhren in der Quantenmechanik und arbeitet dabei auch eng mit Sieroka zusammen. Eine Hürde, die man überwinden muss, betrifft die prinzipielle Unschärfe der Quantenmechanik: Diese besagt, dass man kein Quantensystem untersuchen kann, ohne dass es sich verändert.

Das gilt auch für die Zeitmessung, wie Wolfgang Pauli, der Physik-Nobelpreisträger von 1945 und frühere ETH-Professor, als Erster feststellte. «Zu Zeiten von Pauli war die Uhr etwas Externes. Man beobachtete ein Quantensystem und die klassische Uhr war ausserhalb des Systems. Das ist heute anders», erklärt Renner, «heute fassen wir auch die Uhr als Quantensystem auf, und dann gilt auch für sie, dass man die Zeit nicht ablesen kann, ohne dass man die Uhr verändert.» Deshalb, so Renner, werde die Zeitmessung umso ungenauer, je kleiner das Quantensystem sei, das man als Uhr verwende. Zuversichtlich stimmen Renner die technologischen Fortschritte der vergangenen zehn Jahre: «Wir haben heute an der ETH Zürich eine ganze Reihe hochentwickelter Quantentechnologien, die uns helfen zu verstehen, wie die Zeit auf dem Niveau von Atomen – oder darunter – abläuft.»

### Die Welt der Attosekunden

Elektronen sind typische Quantenobjekte. Um sich in Molekülen oder Atomen zu bewegen, benötigen sie etwa 100 Attosekunden. Das sind 0,0000000000000001 Sekunden. Zum Vergleich: Ein Augenzwinkern dauert eine Sekunde. Um diese ultrakurzen Reaktionen zu messen, setzt man heute hochintensive Laserpulse ein. «Laserpulse können sehr gute Uhren sein», sagt Axel Schild. Der Ambizione-Fellow entwickelt an der ETH-Professur für Ultraschnelle Spektroskopie und Attosekundenforschung eine neue Rechenmethode, wie man solche Bewegungen in ultrakurzen Laserfeldern simulieren kann.

Das funktioniert so: Man beginnt mit einem geschlossenen Quantensystem, zum Beispiel einem, das aus einem Molekül und einem Laserfeld besteht. Dieses Gesamtsystem hat nähe-

ungsweise keine Wechselwirkungen mit der Umgebung. Innerhalb des Systems bestimmt der Forscher willkürlich einen Teil als Uhr und einen Teil als das eigentliche Quantensystem. Die Zeit wird definiert, indem man die Veränderungen der Uhr und des Quantensystems vergleicht. Der Clou ist, dass es im Gesamtsystem zunächst gar keine Zeit gibt. Sie wird durch die unterschiedliche Behandlung von Quantensystem und Uhr erst eingeführt – zum Beispiel indem man die Freisetzung eines Elektrons aus dem Molekül mit dem Zustand des Laserfelds vergleicht. «Ein geschlossenes System hat – wie auch das Universum – zunächst keine Zeit, da es keinen Bezug zu seiner Umgebung hat», sagt Schild, «und eigentlich gibt es eine Zeit auch nur in dem Fall, dass die gewählte Uhr die Zeit so eindeutig anzeigt wie der Zeiger einer klassischen Uhr.»

Auch dieses Vorgehen ist nicht beliebig genau: Da man in dem Gesamtsystem verschiedene Uhren bestimmen kann, wird die gemessene Zeit von der gewählten Uhr abhängig. Verschiedene Uhren geben vielleicht andere Zeiten an. Das Messergebnis entspricht so nur bedingt der Vorstellung einer uhrunabhängigen, «wirklichen» Zeit – und führt zurück zu philosophischen Fragen. «Zeit ist deutlich mehr als nur ein philosophisches Thema unter vielen», sagt Sieroka, «Zeit ist eine grundlegende Dimension des menschlichen Daseins, die in unterschiedlichen Erscheinungsformen auftritt.» ○

### WEITERE INFORMATIONEN

**Renato Renner** ist Professor für Theoretische Physik und Leiter der Forschungsgruppe für Quanteninformationstheorie. Seine Forschung umfasst die Quanteninformations-Wissenschaften, die Quanten-Thermodynamik sowie die Grundlagen der Quantenphysik.  
→ [www.qit.ethz.ch](http://www.qit.ethz.ch)

**Axel Schild** entwickelt an der Professur für Ultraschnelle Spektroskopie und Attosekundenforschung mit einem Ambizione-Beitrag des Schweizerischen Nationalfonds eine neue Methode zur Simulation der Dynamik von Elektronen in Molekülen, die mit starken, ultrakurzen Laserpulsen interagieren.  
→ [www.atto.ethz.ch/AmbizioneAxelSchild](http://www.atto.ethz.ch/AmbizioneAxelSchild)

**Norman Sieroka** hat als Privatdozent und Geschäftsführer des ETH Turing Centre und Mitglied der «Critical Thinking»-Initiative an der ETH Zürich eine eigene «Philosophie der Zeit» verfasst. Seit April 2019 ist er Professor für Philosophie der Universität Bremen.