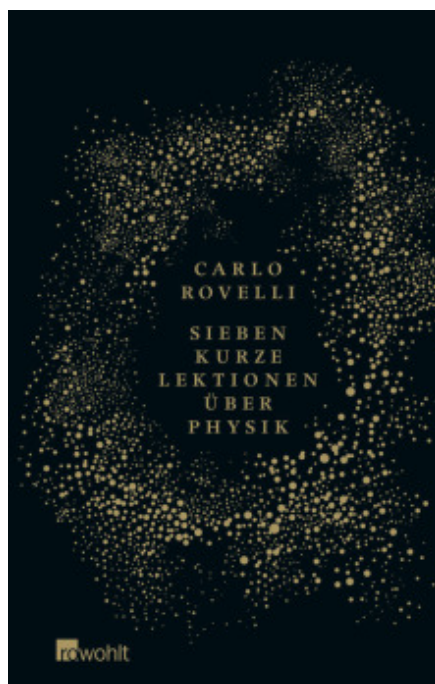


Leseprobe aus:

**Carlo Rovelli**

# **Sieben kurze Lektionen über Physik**



Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf [rowohlt.de](http://rowohlt.de).

CARLO ROVELLI

SIEBEN  
KURZE  
LEKTIONEN  
ÜBER  
PHYSIK



Aus dem Italienischen  
von Sigrid Vagt

ROWOHLT

Die italienische Originalausgabe erschien 2014  
unter dem Titel «Sette brevi lezioni di fisica»  
bei Adelphi Edizioni, Mailand.

Die Übersetzerin dankt dem Deutschen Übersetzerfonds  
für die großzügige Förderung dieser Arbeit.

1. Auflage September 2015

Copyright © 2015 by Rowohlt Verlag GmbH,

Reinbek bei Hamburg

«Sette brevi lezioni di fisica» Copyright

© 2014 by Adelphi Edizioni S.p.A., Mailand

Lektorat Frank Strickstroek

Wissenschaftliches Lektorat Bernd Schuh

Die Lukrez-Zitate auf den Seiten 89, 90 folgen der

Ausgabe von «Über die Natur der Dinge» in

der Übersetzung von Klaus Binder, Galiani, Berlin 2014

Einbandgestaltung Anzinger | Wüschner | Rasp, München,

nach dem Entwurf der englischen Ausgabe bei

Allen Lane / Penguin (Gestaltung Coralie Bickford-Smith)

Satz aus der Apollo, InDesign,

bei Pinkuin Satz und Datentechnik, Berlin

Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany

ISBN 978 3 498 05804 3

# *Inhalt*

*Vorwort* 9

ERSTE LEKTION: *Die schönste der Theorien* 11

ZWEITE LEKTION: *Die Quanten* 21

DRITTE LEKTION: *Die Architektur des Kosmos* 31

VIERTE LEKTION: *Teilchen* 39

FÜNFTE LEKTION: *Raumkörnchen* 47

SECHSTE LEKTION: *Die Wahrscheinlichkeit, die Zeit  
und die Wärme der Schwarzen Löcher* 59

*Zum Abschluss: Wir* 75

*Register* 93



*Sieben kurze Lektionen über Physik*





## *Vorwort*

Diese Lektionen wurden für Leser geschrieben, die eher wenig über die modernen Naturwissenschaften wissen. In einem kurzen Überblick veranschaulichen sie einige der wichtigsten und faszinierendsten Aspekte der großen Revolution, die in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts stattgefunden hat, und erläutern vor allem die dadurch aufgeworfenen Fragen und Rätsel. Denn die Naturwissenschaft zeigt uns, wie wir die Welt besser verstehen können, aber sie zeigt uns auch, wie viel wir noch nicht wissen.

Die erste Lektion ist der «schönsten der Theorien» gewidmet, der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Die zweite der Quantenmechanik, in der sich die verwirrendsten Aspekte der modernen Physik verbergen. Die dritte beschäftigt sich mit dem Kosmos: der Architektur des Universums, in dem wir leben. Die vierte mit den Elementarteil-



chen. Die fünfte mit der Quantengravitation: den fortschreitenden Bemühungen um eine Synthese der großen Entdeckungen des zwanzigsten Jahrhunderts. Die sechste mit der Wahrscheinlichkeit und der Wärme der Schwarzen Löcher. Der Schlussteil des Buches wendet sich der Frage zu, wie wir uns innerhalb der sonderbaren Welt, die diese Physik beschreibt, eine Vorstellung von uns selbst machen können.

## ERSTE LEKTION

### *Die schönste der Theorien*



Als junger Mann bummelt Albert Einstein ein Jahr lang herum. Wer keine Zeit vergeudet, kommt nirgendwohin, was die Eltern von Heranwachsenden leider oft vergessen. Nachdem er in Deutschland von der Schule abgegangen war, weil er die Zucht und Strenge auf dem Gymnasium nicht ertrug, folgte er seiner Familie nach Pavia. Das war zu Anfang des Jahrhunderts, und Italien stand am Beginn der industriellen Revolution. Sein Vater errichtete als Ingenieur in der Poebene die ersten Elektrizitätswerke. Albert las Kant und hörte zum Zeitvertreib Vorlesungen an der Universität von Pavia. Rein zum Vergnügen, ohne immatrikuliert zu sein und ohne Examina abzulegen. So wird man ein ernsthafter Wissenschaftler.

Schließlich schreibt er sich in Zürich am Polytechnikum ein und vertieft sich in die Physik. Nur wenige Jahre später, 1905, schickt er drei Artikel an

die damals renommierteste wissenschaftliche Zeitschrift, die «Annalen der Physik». Alle drei sind nobelpreiswürdig. Der erste beweist die tatsächliche Existenz der Atome. Der zweite öffnet die Tür zur Quantenmechanik, von der in der nächsten Lektion die Rede sein wird. Der dritte stellt seine erste Theorie der Relativität vor (heute «Spezielle Relativitätstheorie» genannt), die erklärt, dass die Zeit nicht für alle gleich schnell vergeht: Zwei Zwillinge treffen sich unterschiedlich gealtert wieder, wenn einer von beiden mit sehr hoher Geschwindigkeit eine große Entfernung zurückgelegt hat.

Unversehens wird Einstein zum renommierten Wissenschaftler und bekommt Angebote von verschiedenen Universitäten. Doch etwas stört ihn: Seine Relativitätstheorie, wie gefeiert auch immer, stimmt nicht mit dem überein, was man über die Schwerkraft weiß, also darüber, wie die Dinge fallen. Dies wird ihm klar, als er für eine Zeitschrift einen Artikel über seine Theorie schreibt, und er fragt sich, ob die altehrwürdige Gravitationslehre des großen Vaters Newton nicht ebenfalls revidiert werden muss, damit sie mit der neuen Relativität kompatibel wird. Er vertieft sich in das Problem. Bis es gelöst ist, dauert es zehn Jahre. Zehn Jahre lang verrückte Forschungen, Versuche, Irrtümer, Verwirrung, misslungene Artikel, Geistesblitze, Fehlschlüsse. Im November 1915 schließlich gibt er

einen Artikel in den Druck, der die vollständige Lösung enthält: eine neue Theorie der Gravitation, der er den Namen «Allgemeine Relativitätstheorie» gibt, sein Meisterwerk. Der große russische Physiker Lew Landau nannte sie die «schönste der wissenschaftlichen Theorien».

Es gibt vollkommene Meisterwerke, die uns tief berühren, Mozarts «Requiem», die «Odyssee», die Sixtinische Kapelle, «König Lear» ... Sie in all ihrem Glanz zu erfassen, mag eine entsprechende Ausbildung voraussetzen. Doch der Lohn ist Schönheit pur. Und nicht nur das: Auch ein neuer Blick auf die Welt tut sich vor unseren Augen auf. Eines dieser Meisterwerke ist die Allgemeine Relativitätstheorie, das Juwel von Albert Einstein.

Ich erinnere mich, wie aufgeregt ich war, als ich anfang, etwas davon zu begreifen. Es war Sommer. Ich war an einem Strand in Kalabrien, in Condofuri, eingetaucht in das Licht dieser griechisch geprägten Mittelmeerküste, im letzten Jahr meines Studiums. Die Ferienzeit eignet sich am besten zum Lernen, weil man nicht durch die Lehrveranstaltungen abgelenkt ist. Das Buch, das ich zum Lernen benutzte, war an den Rändern von Mäusen angenagt, weil ich damit nachts in dem etwas hippiemäßigen, verwahrlosten Haus in den umbrischen Hügeln, wohin ich gelegentlich vor der Langeweile der Universitätsvorlesungen in Bologna geflohen war, immer die

Löcher dieser armen Tierchen verstopft hatte. Hin und wieder blickte ich vom Buch auf und betrachtete das Funkeln des Meeres. Es kam mir vor, als sähe ich das Sichkrümmen von Raum und Zeit, wie es Einstein sich vorgestellt hatte.

Es war wie ein Zauber: als ob ein Freund mir eine einzigartige verborgene Wahrheit ins Ohr flüsterte, einen Schleier vor der Realität fortnahm und eine einfachere, tiefere Ordnung enthüllte. Seit wir gelernt haben, dass die Erde rund ist und sich wie ein rasender Kreisel dreht, haben wir begriffen, dass die Realität nicht so ist, wie sie uns erscheint. Wenn wir ein neues Detail errahnen, ist das jedes Mal aufregend. Ein weiterer Schleier fällt.

Immer wieder hat sich unser Wissen im Lauf der Geschichte sprunghaft voranbewegt. Doch der Sprung, den Einstein vollbrachte, ist wohl ungleich. Warum? Vor allem, weil die Theorie, hat man erst einmal verstanden, wie sie funktioniert, so einfach ist, dass es einem den Atem nimmt. Ich fasse die Idee zusammen:

Newton hatte versucht zu erklären, warum die Dinge fallen und die Planeten kreisen. Er entwickelte die Vorstellung von einer «Kraft», die alle Körper zueinander hinzieht, und nannte sie «Gravitation». Wie diese Kraft es anstellt, weit voneinander entfernte Dinge ohne irgendeine Vermittlung zueinander hinzuziehen, das blieb dem Wissen vorenthal-

ten, und der große Vater der Wissenschaft hütete sich wohlweislich, Vermutungen zu riskieren. Weiter stellte sich Newton vor, dass sich die Körper im Raum bewegen und der Raum ein großer leerer Behälter ist, eine Riesenschachtel für das Universum. Ein gewaltiges starres Gebilde, in dem die Dinge geradlinig ihre Bahn ziehen, bis eine Kraft sie ablenkt. Woraus dieser von Newton erdachte «Raum», dieser Weltbehälter, bestand, auch das blieb dem Wissen entzogen.

Doch wenige Jahre vor Alberts Geburt hatten zwei große britische Physiker, Faraday und Maxwell, die leere Welt Newtons um eine weitere Zutat ergänzt: das elektromagnetische Feld. Das Feld ist eine allgegenwärtige reale Entität, die die Radiowellen trägt, den Raum füllt, wie die Oberfläche eines Sees wogen und schwanken kann und die Elektrizität «ringsum verteilt». Einstein fasziniert das elektromagnetische Feld von Kindheit an, es bewegt die Generatoren in den von Papa erbauten Elektrizitätswerken, und schon früh begreift er, dass ebenso wie die Elektrizität auch die Gravitation von einem Feld getragen sein muss. Entsprechend dem «elektrischen Feld» muss es auch ein «Gravitationsfeld» geben; und er denkt darüber nach, wie dieses «Gravitationsfeld» beschaffen sein könnte und mit welchen Gleichungen es sich beschreiben ließe.

Und dann hat er die verblüffende Idee, den genia-

len Einfall: Das Gravitationsfeld ist nicht *im Raum ausgebreitet*, sondern es *ist* der Raum. Das ist der Grundgedanke der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Newtons «Raum», in dem sich die Dinge bewegen, und das «Gravitationsfeld» als Träger der Schwerkraft sind ein und dasselbe.

Es ist eine Erleuchtung. Eine eindrucksvolle Vereinfachung der Welt: Der Raum ist nicht länger etwas anderes als die Materie. Er ist eine der «materiellen» Komponenten der Welt. Eine wogende, sich biegende, sich krümmende, sich verformende Entität. Wir sind nicht in einem unsichtbaren starren Gebilde gefangen, sondern gewissermaßen in eine Art Molluske, in einen riesigen verformbaren Weichkörper, eingebettet. Die Sonne biegt den Raum um sich herum, und die Erde dreht sich nicht deshalb um die Sonne, weil sie von einer geheimnisvollen Kraft gezogen wird, sondern weil sie sich geradlinig in einem Raum bewegt, der gebogen ist. Wie eine Kugel, die in einen Trichter rollt. Es gibt keine geheimnisvollen «Kräfte», die in der Mitte des Loches entstehen, sondern die Krümmung der Wände lässt die Kugel rollen. Die Planeten kreisen um die Sonne, und die Dinge fallen, weil der Raum sich krümmt.

Wie kann man die Krümmung des Raums beschreiben? Der größte Mathematiker des neunzehnten Jahrhunderts, Carl Friedrich Gauß, der «Fürst

der Mathematiker», hatte eine Mathematik zur Beschreibung gekrümmter zweidimensionaler Flächen wie der Oberfläche von Hügeln verfasst. Dann forderte er einen begabten unter seinen Studenten auf, das Ganze auf drei- oder mehrdimensionale gekrümmte Räume zu verallgemeinern. Der Student, Bernhard Riemann, fertigte eine jener mühevollen Doktorarbeiten an, die vollkommen nutzlos erscheinen. Mit dem Ergebnis, dass die Merkmale eines gekrümmten Raums von einem bestimmten mathematischen Werkzeug erfasst werden, das wir heute Krümmungstensor nennen und mit  $R$  bezeichnen. Einstein stellt eine Gleichung auf, die besagt, dass  $R$  der Energie der Materie proportional ist. Das heißt, der Raum krümmt sich dort, wo Materie ist. Das ist alles. Die Gleichung besteht aus einer halben Zeile, mehr nicht. Eine Vision – der sich krümmende Raum – und eine Gleichung.

Aber in dieser Gleichung ist ein funkelndes Universum enthalten. Die Theorie erweist sich als faszinierend fruchtbar und löst eine phantastische Folge von Vorhersagen aus, die den Wahnideen eines Verrückten gleichen, und doch werden alle später experimentell bestätigt.

Zunächst einmal beschreibt die Gleichung, wie sich der Raum um einen Stern krümmt. Aufgrund dieser Krümmung kreisen nicht nur die Planeten um den Stern; auch das Licht breitet sich nicht länger



geradlinig aus, sondern weicht von seiner Bahn ab. Einstein sagt voraus, dass die Sonne das Licht ablenkt. 1919 wird die Messung durchgeführt, und die Vorhersage erweist sich als zutreffend.

Aber nicht nur der Raum krümmt sich, sondern auch die Zeit. Einstein sagt voraus, dass die Zeit in der Höhe schneller vergeht als unten, in Erdnähe. Das wird nachgemessen, und es stimmt. Der Unterschied ist gering, aber der Zwilling, der am Meer lebt, findet den Zwilling, der in den Bergen gelebt hat, ein wenig älter vor, als er selbst es ist. Und das ist erst der Anfang.

Wenn ein großer Stern seinen gesamten Brennstoff (den Wasserstoff) verbrannt hat, erlischt er schließlich. Was übrig bleibt, wird nicht mehr durch die Verbrennungswärme stabilisiert und fällt unter dem Druck seines eigenen Gewichts in sich zusammen, bis es den Raum so stark krümmt, dass es in ein veritables Loch stürzt. So entstehen die berühmten *Schwarzen Löcher*. Als ich studierte, galten sie noch als wenig glaubwürdige Vorhersage einer esoterischen Theorie. Heute werden sie am Himmel zu Hunderten beobachtet und von den Astronomen in ihren Details erforscht. Doch damit nicht genug.

Der gesamte Raum kann sich weiten und dehnen. Ja, die Einstein'sche Gleichung besagt sogar, dass der Raum nicht in Ruhe verharren kann, sondern

expandieren *muss*. 1930 wird die Ausdehnung des Universums tatsächlich beobachtet. Wie die Gleichung auch voraussagt, muss die Expansion durch die Explosion eines winzig kleinen und extrem heißen jungen Universums ausgelöst worden sein: den *Big Bang*. Und wieder glaubt es niemand, doch die Beweise häufen sich, bis am Himmel die *kosmische Hintergrundstrahlung* beobachtet wird: die diffuse Strahlung, die von der Hitze der Anfangsexplosion noch übrig ist. Die Voraussage der Einstein'schen Gleichung ist richtig.

Und weiter sagt die Theorie voraus, dass sich der Raum kräuselt wie die Meeresoberfläche. Die Auswirkungen dieser «Gravitationswellen» werden am Himmel an Doppelsternen beobachtet und stimmen mit den Vorhersagen der Theorie überein, bis zu einer unglaublichen Genauigkeit von eins zu hundert Milliarden. Und so weiter.

Kurz, die Theorie beschreibt eine bunte, erstaunliche Welt, in der Universen explodieren, der Raum in ausweglosen Löchern versackt, die Zeit sich beim Herabsinken auf einen Planeten verlangsamt und die grenzenlosen Weiten des interstellaren Raums sich kräuseln und wogen wie die Meeresoberfläche ... und all dies, was da nach und nach aus meinem von den Mäusen angenagten Buch zum Vorschein kam, war kein Märchen, das ein Schwachsinniger in einem Anfall von Phantasterei erzählte, nicht die

Auswirkung der glühenden Mittelmeersonne in Kalabrien, keine Halluzination über dem Flimmern des Meeres. Es war Realität.

Oder besser, eine Realität, die etwas weniger verschleiert war als in unserer getrübbten Alltagssicht. Eine Realität, die ebenfalls aus dem Stoff besteht, aus dem die Träume sind, aber doch realer ist als unser vernebelter Alltagstraum.

All dies war das Resultat einer elementaren Intuition – Raum und Feld sind ein und dasselbe – und einer einfachen Gleichung, die ich nicht umhinkann, hier niederzuschreiben, auch wenn meine Leser sie sicher nicht entschlüsseln können, aber ich möchte wenigstens deren große Einfachheit sichtbar machen.

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$$

Das ist alles. Natürlich muss man eine Ausbildung absolvieren, um die Riemann'sche Mathematik zu verstehen, und sich die Technik aneignen, um diese Gleichung lesen zu können. Ein gewisses Maß an Fleiß und Mühe ist dafür erforderlich. Allerdings weniger, als man braucht, um die seltene Schönheit eines der letzten Beethoven-Quartette hören zu können. Belohnt aber wird man im einen wie im andern Fall mit Schönheit und einem neuen Blick auf die Welt vor unseren Augen.