



Thomas Bürke stellt die wesentlichen Aspekte der Einstein'schen Theorie dar und zeigt die Entwicklung bis zum gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse. Er schildert Freunde wie Feinde und den Widerhall in Literatur und Kunst. Kurze Interviews mit zeitgenössischen Koryphäen runden den Band ab.

»... ein breites Spektrum an historischen Hintergründen und vielfältigen astronomischen und kosmologischen Konsequenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie sowie ein Eindruck von Physik und Astronomie als intellektuelle Großbaustelle.«
Per Dauscher, Physik Journal

»Es gehört in die Bibliothek eines jeden Einstein-Fans!«
Helmut Hornung, MaxPlanckForschung

Thomas Bürke, geboren 1956, ist Diplomphysiker und promovierte 1986 am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg über ein Thema aus dem Gebiet der Sternentstehung. Seit 1990 arbeitet er als freier Wissenschaftsjournalist im Bereich Physik und Astronomie und ist außerdem Redakteur der Zeitschrift ›Physik in unserer Zeit‹. Diverse Veröffentlichungen. Im Einstein-Jahr 2005 erhielt Thomas Bürke den Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik, 2013 ehrte ihn die Deutsche Physikalische Gesellschaft mit der Publizistikmedaille.

Thomas Bürke

EINSTEINS JAHRHUNDERTWERK

Die Geschichte einer Formel

Mit s/w-Abbildungen
und farbigem Bildteil

dtv

**Ausführliche Informationen
über unsere Autoren und Bücher**
www.dtv.de

Von Thomas Bürke im dtv:
Genial gescheitert. Schicksale großer Entdecker und Erfinder
(dtv 24928)

Albert Einstein (dtv 31074)

Auch als E-Book erhältlich



Aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2016

© 2015 dtv Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, München

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Sämtliche,
auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Umschlaggestaltung: dtv unter Verwendung eines Fotos
von picture-alliance/UnitedArchives/TopFoto

Abbildungen im Innenteil (s/w): Nadine Schnyder

Gesetzt aus der Plantin 10/12,25'

Satz: Greiner & Reichel, Köln

Druck und Bindung: Druckerei Kösel, Krugzell

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany · ISBN 978-3-423-34898-0

Inhalt

Vorwort: Einstein und sein Jahrhundertwerk	7
1 Eine kurze Geschichte von Raum und Zeit	
Die Spezielle Relativitätstheorie	12
2 Der gekrümmte Raum vor Einstein	
Geschichte der nicht-euklidischen Geometrie und ihre Auswirkungen	31
3 Ein Mann fällt vom Dach	
Der Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie	47
4 Die Jahrhundertarbeit	
Der Inhalt der Veröffentlichung zur Allgemeinen Relativitätstheorie	77
5 »Lichter am Himmel alle schief«	
Die Lichtablenkung am Rand der Sonne	85
6 Licht wird röter, die Zeit beginnt zu schleichen	
Die gravitative Rotverschiebung	98
7 Im Strudel von Raum und Zeit	
Schwarze Löcher und die Drehung der Raumzeit	108
8 Und es expandiert doch	
Von der Kosmologischen Konstante zur Dunklen Energie	136
Interview mit Norbert Straumann	165

9 Wellen kräuseln die Raumzeit

Himmelskörper strahlen Gravitationswellen ab	169
Interview mit Karsten Danzmann	200
Interview mit Luciano Rezzolla	203

10 Linsen aus Raum und Zeit

Der Gravitationslinseneffekt macht die Raumkrümmung sichtbar	212
---	-----

11 Die Suche nach der Weltformel

Einsteins Versuch, Gravitation und Elektrodynamik zu vereinen, und heutige Ansätze zu einer Quantengravitation.	225
Interview mit Claus Kiefer	243

12 Himmlische Navigation

Kein Global Positioning System (GPS) ohne Einstein	249
---	-----

13 Keine Alternative in Sicht

Konkurrenten der Allgemeinen Relativitätstheorie	254
---	-----

14 Geschichten aus dem flachen Land

Die vierte Dimension in der Literatur	260
---	-----

15 Picasso und die vierte Dimension

Der Einfluss der Physik auf die moderne Malerei	272
--	-----

Literaturnachweis	279
------------------------------------	-----

Bildnachweis	286
-------------------------------	-----

Register	287
---------------------------	-----

Vorwort: Einstein und sein Jahrhundertwerk

Es war ein kleines Zittern des Raumes, aber ein großes Beben für die Physik, als am 14. September 2015 über die Erde eine Gravitationswelle hinwegrauschte. Kein Mensch bemerkte etwas davon, nur zwei Messinstrumente namens *Advanced Ligo* in den USA registrierten eine kurzzeitige Verbiegung des Raumes. Das Signal dauerte lediglich zwei Zehntelsekunden, war aber so deutlich und wie aus dem Lehrbuch, dass die beteiligten Forscher anfangs an einen technischen Fehler glaubten. Eine genaue Analyse bewies letztlich: Sie hatten eine Gravitationswelle nachgewiesen – ein Jahrhundert nach Einsteins Vorhersage dieses Phänomens. Es war, als hätte der große Physiker selbst dabei seine Hand im Spiel gehabt.

Ursache waren zwei Schwarze Löcher, die zusammengestoßen und miteinander verschmolzen waren. Zu diesem Zeitpunkt war dieser Crash das gewaltigste Ereignis im Universum: In Form von Gravitationswellen wurde 50-mal mehr Energie frei als alle Sterne im Universum zusammen in Form von Licht und anderen elektromagnetischen Wellen abstrahlten!

Diese nobelpreiswürdige Entdeckung gilt nicht nur als fehlender Baustein der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern sie öffnet ein völlig neues Beobachtungsfenster ins Universum. Es stehen auch andere Vorgänge, wie die Kollisionen von Neutronensternen oder explodierende Sterne auf dem Beobachtungsplan. In ferner Zukunft lockt das Ziel, Gravitationswellen nachzuweisen, die in der extrem heißen und dichten Materie unmittelbar nach dem Urknall entstanden sind. Sie bieten nach dem derzeitigen Kenntnisstand die einzige Möglichkeit, mit Beobachtungen mehr über die Geburt des Universums zu erfahren – das wäre der vielleicht größte Triumph von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

Als Einstein vor einem Jahrhundert nach vielen Irrungen und Wirrungen die Allgemeine Relativitätstheorie vollendet

hatte, war er übergücklich. In Briefen schrieb er von dem wertvollsten Fund, den er in seinem Leben gemacht habe, seine kühnsten Träume waren in Erfüllung gegangen. Und das, obwohl er zehn Jahre zuvor, in seinem Wunderjahr 1905, mit der Speziellen Relativitätstheorie die Physik schon einmal revolutioniert hatte.

Die Spezielle Relativitätstheorie löste mit einem Schlag einige grundlegende Probleme der Physik, die schon seit langem bekannt waren. Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie hatte Einstein jedoch ein völlig neues Konzept der Schwerkraft (Gravitation genannt) entdeckt, das seine Kollegen weitgehend als unnötig empfanden. Schließlich hatte die Newton'sche Theorie der Gravitation 250 Jahre lang perfekt funktioniert. Sie erklärte den Fall des Apfels ebenso wie den Lauf des Mondes um die Erde oder die Bahnen der Planeten um die Sonne. Dennoch machte sich Einstein 1907 auf die Suche nach einer neuen Beschreibung der Gravitation.

Das Ergebnis, das er am 25. November 1915 präsentierte, war eine Theorie »von unvergleichlicher Schönheit«,¹ wie er einem Freund schrieb. Ausgangspunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Tatsache, dass ein Körper im freien Fall gewichtslos ist. Die Schwerkraft scheint für ihn aufgehoben zu sein. Diese längst bekannte Tatsache offenbarte Einstein eine für ihn erstaunliche Wesensverwandtheit zwischen Schwerkraft und Beschleunigung. Acht Jahre lang fragte er sich, was hinter diesem Phänomen stecken könnte. Das Ergebnis: Die Gravitation ist keine auf unbekannte Art und Weise wirkende Kraft, wie Newton meinte, sondern eine Eigenschaft von Raum und Zeit: Die Materie krümmt den Raum, und der Raum zwingt die Materie zu bestimmten Bewegungen. Der Mond umkreist die Erde nicht, weil unsichtbare Kraftlinien die beiden Körper aneinanderbinden, sondern weil die Erde den umgebenden Raum eindellt wie eine Eisenkugel ein gespanntes Gummituch und der Mond sich in dieser Mulde um die Erde bewegt.

Dies ist der faszinierendste Aspekt der Allgemeinen Relativitätstheorie: Die Gravitation ist eine Eigenschaft der Geo-

metrie von Raum und Zeit. Darin ist sie einzigartig: Alle anderen Naturkräfte wirken in der Zeit und im Raum. Die Gravitation *ist* Raum und Zeit. Max von Laue schrieb dazu, die gekrümmte Raumzeit »ist keineswegs eine mathematische Erfindung, sondern eine allen physikalischen Vorgängen zugrunde liegende Realität. Diese Erkenntnis ist Albert Einsteins größte Leistung.«²

Fast so erstaunlich wie das Ergebnis war auch der Weg dorthin. Während die andere große physikalische Theorie des 20. Jahrhunderts, die Quantenmechanik, das Werk von vielen ist, hat Einstein seine Gravitationstheorie so gut wie im Alleingang entwickelt. Lediglich einmal benötigte er die Hilfe seines Freundes Marcel Grossmann, als er im Dickicht der Mathematik nicht mehr ein und aus wusste.

Interessanterweise beschäftigten sich schon im 19. Jahrhundert vorwiegend Mathematiker mit der Frage, ob in dem uns umgebenden Raum wirklich die euklidische Geometrie gilt oder nicht. Wie das Leben in einer Welt mit einem gekrümmten Raum aussehen könnte, versuchten sie unter anderem in Form von Erzählungen darzustellen. Bemerkenswert sind aber auch die wenig bekannten Untersuchungen der Astronomen Johann Carl Friedrich Zöllner (1872) und Karl Schwarzschild (1900), die schon vor Einstein der Frage nachgingen, ob das Universum ein in sich geschlossener, sphärischer Raum, also ein »Kugeluniversum«, sein könne.

Nach der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie verhielten sich die meisten Kollegen zurückhaltend bis ablehnend. Einstein beklagte die Jämmerlichkeit der Menschen und setzte nun alles daran, einige Vorhersagen, in denen seine Theorie von der Newton'schen abwich, mit astronomischen Beobachtungen zu bestätigen.

Es ist ein bemerkenswerter Aspekt der facettenreichen Geschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie, dass ausgerechnet britische Astronomen im Jahre 1919 während einer totalen Sonnenfinsternis Einsteins Vorhersage der Lichtablenkung im Schwerfeld der Sonne bestätigten – ein Jahr nach Ende des Ersten Weltkrieges, in dem sich britische und deutsche Sol-

daten unerbittlich bekämpft hatten. Der britische Astronom Sir Arthur Eddington sagte, es sei für die wissenschaftlichen Beziehungen zwischen England und Deutschland das Beste gewesen, was sich ereignen konnte. Der englische Physiker und Schriftsteller C.P. Snow bezeichnete Einstein als Fürsprecher für die Hoffnungen der Menschen. »Es scheint«, so schrieb er, »dass die Menschen – vielleicht als eine Art Befreiung von den Schrecken des Krieges – ein menschliches Wesen brauchten, das sie verehren konnten.«³

Die Bestätigung der Lichtablenkung verhalf der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Durchbruch. Tageszeitungen in aller Welt berichteten euphorisch über den Sturz Newtons und die Revolution in der Physik. Dabei ist der damalige Rummel rational kaum nachvollziehbar. Wer verstand schon, was es mit dem gekrümmten Raum auf sich hatte? Es spielte offenbar gar keine Rolle, ob man die Worte des Meisters verstand, eher im Gegenteil. Gerade das Unvorstellbare und Rätselhafte verstärkte die Bewunderung für den genialen Denker. Einstein hat diese Aufregung um ihn und seine Theorie ebenso gesehen: »Ich bin sicher, dass es das Mysterium des Nicht-Verstehens ist, was sie [die Massen] so anzieht.«⁴

Trotz dieser Aufregung im Jahr 1919 fristete die Allgemeine Relativitätstheorie jahrzehntelang ein karges Dasein. Die Quantenphysik hingegen machte größere Fortschritte, weil sie in der aufstrebenden Erkundung der Elementarteilchen oder bei der Charakterisierung und Beschreibung von Materialien unerlässlich war und immer weiter entwickelt wurde. Das änderte sich erst ab den 1960er Jahren, als Astrophysik und Kosmologie immer neue Erfolge feierten: die Bestätigung der Urknalltheorie, die Entdeckung von Neutronensternen, Pulsaren, Schwarzen Löchern, Gravitationslinsen und der indirekte Nachweis von Gravitationswellen – dies alles lässt sich ohne Allgemeine Relativitätstheorie nicht erklären. Einige ihrer Konsequenzen waren so revolutionär, dass selbst Einstein vor ihnen zurückschreckte. Heute findet seine Gravitationstheorie sogar Eingang in den Alltag, nämlich bei den auf GPS basierenden Navigationsgeräten.

Ohne Übertreibung kann man sagen, Einstein hat einen völlig neuen Kosmos erschlossen – einzig und allein mit Papier und Bleistift. Doch selbst ihr Schöpfer ahnte, dass sie nur ein Vorstadium zu einer noch umfassenderen Theorie ist, die alle Phänomene in der Natur erklärt. Noch heute suchen seine Epigonen nach dieser Ur-Theorie, denn es ist bekannt, dass sowohl Relativitätstheorie als auch Quantentheorie in bestimmten Bereichen versagen, nämlich bei Schwarzen Löchern und dem Urknall: Keine der beiden Theorien ist in der Lage, diese »Singularitäten« zu erklären, in denen der Raum theoretisch unendlich stark gekrümmt und die Dichte unendlich groß ist. Hier versagt die heutige Physik. Deshalb sind seit Jahrzehnten Physiker und Mathematiker rund um die Welt auf der Suche nach einer Theorie der Quantengravitation. Sie ist gewissermaßen der Heilige Gral der Physik. Sie soll den Schleier des Unerklärbaren lüften. Wer weiß, was sie uns an neuen Erkenntnissen bringen wird.

Diese Vielfalt von historischen, physikalischen und kosmologischen Aspekten habe ich versucht, in diesem Buch zu beleuchten. Der Faszination gekrümmter Räume konnten sich auch Literaten und Maler nicht entziehen, wie zwei kulturelle Ausflüge belegen. Dabei ist anschauliches und verständliches Erklären in allen Fällen das Leitmotiv dieses Buches.

Jedem astrophysikalischen Phänomen ist ein eigenes Kapitel gewidmet, in dem von den Anfängen der Einstein'schen Theorie ausgehend die Entwicklung bis in die aktuelle Forschung verfolgt wird. Am Ende dieser Chroniken stehen zum Beispiel Dunkle Materie und Dunkle Energie, verschmelzende Neutronensterne und Schwarze Löcher.

Experten, denen ich an dieser Stelle für ihre freundliche Unterstützung danken möchte, schildern in Interviews den Stand der Erforschung von Gravitationswellen, der Quantengravitation und der Dunklen Energie.

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist heute aktueller denn je. Sie ist ein Jahrhundertwerk.

Thomas Bürke, Juli 2016

I: Eine kurze Geschichte von Raum und Zeit

Die Spezielle Relativitätstheorie

Auf einen Blick

- Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant und kann nicht übertroffen werden.
 - Zeit und Länge sind dynamische Größen, die vom Bewegungszustand des Betrachters abhängen.
 - Die Abweichungen von der Newton'schen Physik machen sich erst bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bemerkbar.
 - Energie E und Materie m sind artverwandt und lassen sich ineinander umwandeln. Sie hängen über die Formel $E = mc^2$ miteinander zusammen.
 - Der Äther existiert nicht.
-

Die Allgemeine Relativitätstheorie krönte Einsteins wissenschaftliche Karriere. Sie steht jedoch insofern nicht allein da, als sie auf seiner 1905 veröffentlichten Speziellen Relativitätstheorie aufbaut. Es ist deshalb unerlässlich, die wichtigsten Erkenntnisse dieses nicht minder revolutionären Werkes zu verstehen. Der Kern beider Theorien ist ein fundamental neues Verständnis von Raum und Zeit. Um diesen Umsturz nachzuvollziehen, rufen wir uns kurz den Stand der entscheidenden physikalischen Gesetze ins Gedächtnis, die Ende des 19. Jahrhunderts als unumstößlich galten.

Alles ist relativ – wirklich?

Den Begriff der Relativität hat nicht Einstein eingeführt. Er bildete bereits die Grundlage der klassischen Physik von Galilei und Newton und beschreibt, wie die Gesetze der Physik Beobachtern erscheinen, die sich *relativ* zueinander bewegen. Galileo Galilei formulierte schon 1632 in seinem »Dialog über die beiden hauptsächlichen zwei Weltsysteme« das Relativitätsprinzip. Demnach laufen in gleichförmig bewegten Sys-

temen alle Vorgänge unverändert ab. Gleichförmig meint mit konstanter Geschwindigkeit.

Jeder kennt die Situation: Man sitzt in einem Zug, der im Bahnhof hält. Auf dem Nachbargleis steht ebenfalls ein Zug. Plötzlich, so meinen wir, fahren wir langsam los, denn die anderen Waggons bewegen sich aus unserem Blickfeld hinaus. Schließlich sind sie gänzlich verschwunden, doch zu unserem Erstaunen haben nicht wir den Bahnhof verlassen, sondern der Zug gegenüber. Im Nachbarzug aber hatten einige Reisende vermutlich genau das Gegenteil empfunden und gemeint, sie selbst würden stehen bleiben und wir uns bewegen. Dieses Phänomen lässt sich nur dann beobachten, wenn die Beschleunigung des Zuges zu gering ist, um von uns wahrgenommen zu werden, das heißt wenn sich der Zug mit nahezu konstanter Geschwindigkeit bewegt. Dann können wir nicht zwischen Ruhe und Bewegung unterscheiden. Fahren wir in einem ICE mit 200 km/h und lassen einen Kugelschreiber los, so wird er senkrecht nach unten fallen – genau so, als würden wir unbewegt am Bahnsteig stehen.

Vom Standpunkt eines Physikers aus sind beide Personen – oder wie man sagt: Bezugssysteme – gleichberechtigt. Alle Vorgänge laufen im gleichförmig bewegten System exakt so ab wie in einem ruhenden. Beide Systeme sind ununterscheidbar, weswegen der Begriff Ruhe aus physikalischer Sicht relativ ist, wie uns das Beispiel der Personen in den beiden Zügen im Bahnhof zeigt. Solche gleichförmig bewegten Systeme nennen Physiker Inertialsysteme.

Geschwindigkeiten sind immer relativ und hängen davon ab, von wo aus sie gemessen werden. Nehmen wir an, auf einer Autobahn versuchen zwei Autos, die bezüglich eines an der Straße stehenden Radars der Polizei mit jeweils 120 km/h fahren, einander zu überholen. Auf der Gegenseite kommt ihnen ein PKW mit 150 km/h bezüglich des Radars entgegen. Die beiden Autofahrer bewegen sich nun relativ zueinander gar nicht, haben also die Relativgeschwindigkeit 0 km/h. Der von ihnen auf der anderen Seite entgegenkommende PKW rast indes mit 270 km/h auf sie zu. Alle Bezugssysteme, so-

wohl das der Autos als auch das am Straßenrand stehende Radar, sind aus physikalischer Sicht gleichberechtigt. Begibt man sich von einem System in das andere, so müssen die Geschwindigkeiten abhängig von der Bewegungsrichtung addiert oder subtrahiert werden.

Isaac Newton übernahm in seinem 1687 erschienenen, fundamentalen Werk ›Philosophiae Naturalis Principia Mathematica‹ das Relativitätsprinzip und kombinierte es mit dem Trägheitssatz. Danach bleibt jeder Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung, solange keine äußeren Kräfte auf ihn einwirken. Ein gutes Beispiel hierfür sind heute interplanetare Raumsonden. Ein Raketentriebwerk beschleunigt sie, bis sie schnell genug sind, um das Schwerefeld der Erde zu verlassen. Dann wird das Triebwerk abgeschaltet, und die Sonde fliegt näherungsweise auf einer geraden Bahn weiter – sieht man einmal von den Schwerkraftinflüssen der anderen Himmelskörper ab.

Bleibt die Frage: Wie kann ich überhaupt feststellen, ob eine Bahn geradlinig verläuft oder nicht? Im All gibt es keine festen Markierungen, die man als Bezugspunkte nutzen könnte. Newton sah damals keinen anderen Ausweg, als einen absoluten Raum zu definieren. Er schrieb: »Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich.« Damit hatte er eine Art imaginäres Koordinatenkreuz geschaffen, anhand dessen sich absolute Ruhe und absolute Bewegung festmachen ließen. Er definierte sogar den Nullpunkt, indem er annahm, das Universum besitze ein ruhendes Zentrum. Dies sah er in dem Schwerpunkt des Sonnensystems, der etwas außerhalb des Sonnenzentrums liegt.

Um entscheiden zu können, ob eine geradlinige Bewegung auch mit konstanter Geschwindigkeit erfolgt, bedurfte es noch eines Zeitmaßes, denn Geschwindigkeit ist definiert als zurückgelegte Entfernung pro Zeitintervall. Hierzu legte Newton fest: »Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.« Die-

se Festlegung ist deshalb so wichtig, weil die Zeitmessung bei der Definition nahezu aller physikalischen Größen der klassischen Physik, wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft, Impuls oder Energie, eine entscheidende Rolle spielt.

Der Raum bildet somit eine Art kosmische Bühne, auf der sich das Weltenspiel entwickelt. Die Zeit fließt gleichförmig wie ein Fluss, auf dem alle Körper mit gleicher Geschwindigkeit dahintreiben. Das Konzept des absoluten Raumes und der absoluten Zeit wurde zwar durchaus nicht von allen Kollegen akzeptiert, wie im nächsten Kapitel weiter ausgeführt wird, aber Newtons Mechanik vermochte alle Vorgänge sowohl auf der Erde als auch im Weltall so gut zu beschreiben, dass lange Zeit niemand an sie rührte.

Der Lichtsurfer betritt die Bühne

Neben dem Newton'schen Werk beherrschte die Elektrodynamik des schottischen Physikers James Clerk Maxwell die Physik des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Um 1855 hatte er eine Theorie entwickelt, mit der er die zahlreichen experimentellen Ergebnisse aus dem Bereich der elektrischen und magnetischen Kräfte in einer einzigen Theorie zusammenfasste. Hierin beschrieb er Licht als eine Form von elektromagnetischen Wellen. Ähnlich, wie sich Wasserwellen auf einem See ausbreiten, sollte sich Licht im Raum bewegen, wobei es im Vakuum die maximale Geschwindigkeit von 300 000 km/s erreicht. In der Analogie zur Wasserwelle sollte sich auch eine elektromagnetische Welle in einem Medium ausbreiten. Die Physiker nannten es Äther.

Damit schien das theoretische Gebäude der Physik errichtet. Als Max Planck 1878 seinem Physikprofessor Philipp von Jolly seinen Entschluss mitteilte, theoretische Physik zu studieren, riet dieser ihm: »Theoretische Physik, das ist ja ein ganz schönes Fach. Aber grundsätzlich Neues werden Sie darin kaum mehr leisten können ... Man kann wohl hier und da in dem einen oder anderen Winkel ein Stäubchen noch aus-

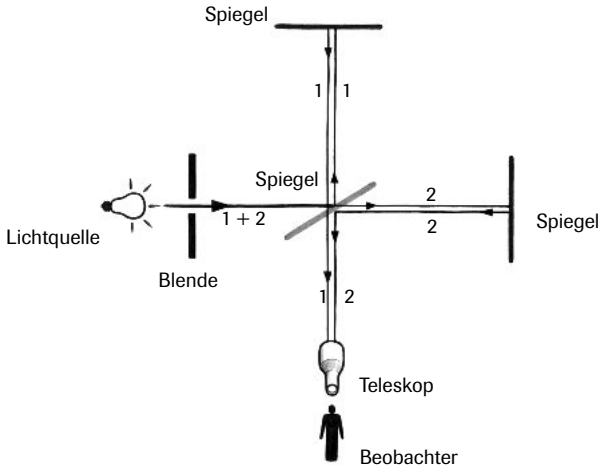
kehren, aber was prinzipiell Neues, das werden Sie nicht finden.«¹

Doch das Neue näherte sich bereits am Horizont. Man musste nur genau hinsehen. Überraschenderweise schien nämlich auf Licht die Newton'sche Physik nicht zuzutreffen. Die Gleichungen, mit denen man seine Ausbreitung beschrieb, nahmen unterschiedliche Formen an, wenn man sich in unterschiedlich schnelle, gleichförmig bewegte Bezugssysteme begab. Licht verhielt sich also nicht so wie Autos auf der Straße, bei denen man die Geschwindigkeiten einfach addieren muss.

Das zeigte sich eindeutig in einem Experiment des Physikers Albert Michelson. Ziel war es, die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Bewegungsrichtungen relativ zum Äther zu messen. Als Bezugssystem diente Michelson sein Laboratorium, das mit der Erde um die Sonne herumwirbelte und somit auch durch den Äther flog. Zwar war weder bekannt, mit welcher Geschwindigkeit noch in welcher Richtung sich die Erde relativ zum Äther bewegt. Auf jeden Fall aber mussten Richtung und Geschwindigkeit an verschiedenen Punkten der Erdbahn, beispielsweise bei Frühlings- und Sommeranfang, unterschiedlich sein.

Michelson führte seine Messung nun nicht an zwei Tagen im Jahr durch, sondern er spaltete einen Lichtstrahl in zwei Teile auf, die sich anschließend senkrecht zueinander durch die Apparatur bewegten. Danach führte er sie wieder zusammen und maß im gemeinsamen Zielpunkt die Differenz der Geschwindigkeiten beider Lichtstrahlen. Diese sollte wegen der unterschiedlichen Bewegungsrichtung relativ zum Äther entstehen.

Ein erster Versuch im Jahre 1881, den Michelson bei einem Studienaufenthalt in Potsdam durchführte, erbrachte keinerlei Unterschied der Lichtgeschwindigkeit auf den beiden Lichtwegen. Daraufhin verfeinerte er seine Apparatur und wiederholte das Experiment sechs Jahre später in den USA mit seinem Kollegen Edward W. Morley. Wieder war das Ergebnis negativ. Das Licht schien stets dieselbe Geschwindig-



Das Experiment von Michelson und Morley zur Messung der Lichtgeschwindigkeit. Ein Lichtstrahl wird an einem halbdurchlässigen Spiegel in zwei senkrecht zueinander laufende Teilstrahlen 1 und 2 aufgespalten. Da sich diese in unterschiedlichen Richtungen zum vermuteten Äther bewegen, hätte der Beobachter Laufzeitunterschiede messen müssen.

keit aufzuweisen, egal wie man sich relativ zum Äther bewegte – ein krasser Widerspruch zur Newton'schen Physik.

Die meisten Physiker ignorierten diesen Widerspruch, einige suchten nach Lösungen, ohne das Gebäude ganz einreißen zu müssen. So vermutete Hendrik Antoon Lorentz von der Universität Leiden, dass sich Michelsons Messapparatur in Bewegungsrichtung verkürze. Dann würde ein Lichtstrahl auf dieser Strecke weniger Zeit benötigen als auf der senkrecht dazu verlaufenden Strecke. Lorentz konnte sogar eine Formel für den Schrumpfungsgrad angeben. Sie war so gewählt, dass die beiden senkrecht zueinander laufenden Lichtstrahlen ihren jeweiligen Weg in derselben Zeit zurücklegen und gemeinsam im Detektor ankommen. Demnach hätte man mit keinem Experiment jemals eine Relativbewegung des Lichts gegen den Äther messen können. Außerdem wäre es auch nicht möglich gewesen, diese Verkürzung der Apparatur zu

messen, da jeder angelegte Messstab im selben Maße wie sie schrumpfen würde.

Es bedurfte jedoch des Genies von Albert Einstein, um das Experiment von Michelson und Morley richtig zu deuten. Der Widerspruch zwischen Maxwells und Newtons Grundaxiomen war ihm mit 16 Jahren aufgefallen, wie er sich später erinnerte: »Wenn ich einem Lichtstrahl nacheile mit Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum), so sollte ich einen solchen Lichtstrahl als ruhendes, räumlich oszillierendes elektromagnetisches Feld wahrnehmen. So was kann es aber nicht geben, weder aufgrund der Erfahrung noch gemäß den Maxwell'schen Gleichungen. Intuitiv schien es mir von vornherein klar, dass von einem solchen Beobachter aus beurteilt alles sich nach denselben Gesetzen abspielen müsse wie für einen relativ zur Erde ruhenden Beobachter. Denn wie sollte der erste Beobachter wissen bzw. konstatieren können, dass er sich im Zustand rascher gleichförmiger Bewegung befindet? Man sieht, dass in diesem Paradoxon der Keim zur Speziellen Relativitätstheorie schon enthalten ist.«²

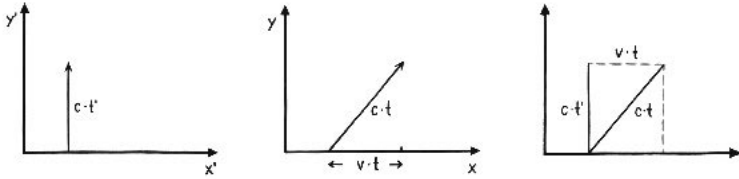
Einstein brauchte weitere zehn Jahre, um diesen Widerspruch zu lösen. In seiner 1905 veröffentlichten Arbeit ›Zur Elektrodynamik bewegter Körper‹ behauptet er, das einfache Galilei-Newton-Gesetz der Geschwindigkeitsaddition sei falsch. Licht bewegt sich stets mit derselben Geschwindigkeit, egal, von welchem Bezugssystem aus ich sie messe. Die Lichtgeschwindigkeit ist nicht relativ, sondern konstant und beträgt (im Vakuum) immer 300 000 km/s. Sie ist eine Naturkonstante. Deswegen ist es auch nicht möglich, neben einer Lichtwelle mit gleicher Geschwindigkeit entlangzufliegen, wie es sich der junge Einstein noch vorgestellt hatte.

Mit mutigem Hieb hatte Einstein den Gordischen Knoten durchschlagen, in dem Newton, Maxwell und Michelson/Morley gefangen waren. Allerdings mit der provozierenden Konsequenz, dass Newton Unrecht hatte und Maxwell auf dem richtigen Weg gewesen war.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit hat enorme Auswirkungen, zum Beispiel auf den Lauf der Zeit.

Wenn die Zeit zu kriechen beginnt

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit steht im krassen Widerspruch zu unserer Alltagserfahrung, wie ein Gedankenexperiment mit einer »Lichtuhr« beweist.



Bewegung eines Lichtstrahls in einem relativ zu einem Beobachter ruhenden (links) und einem bewegten System (Mitte). Unter der Voraussetzung konstanter Lichtgeschwindigkeit lässt sich mit dem Satz des Pythagoras (rechts) der Umrechnungsfaktor der Zeitdilatation herleiten.

Man denke sich zwei parallel angebrachte Spiegel, zwischen denen ein Lichtpuls hin und her reflektiert wird. Jede Reflexion diene als Taktgeber für eine Uhr. Solange diese Lichtuhr in Ruhe ist, schwingt ihr »Pendel« wie jedes andere auch. Doch die Situation ändert sich, wenn man die Uhr senkrecht zum Lichtstrahl in gleichförmige Bewegung versetzt.

Von außen betrachtet läuft der Lichtstrahl nun auf einer Zickzacklinie, und der zurückgelegte Weg wird länger. Entscheidend ist nun, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Deshalb dauert jeder Taktschlag von außen gesehen ein wenig länger als im ruhenden Fall. Die Zeit verläuft also von einem ruhenden Beobachter aus gesehen im bewegten System langsamer. Einstein folgerte: Je schneller man sich bewegt, desto langsamer vergeht von außen betrachtet die Zeit. Für einen Reisenden in dem bewegten System vergeht die Zeit jedoch so langsam wie immer.

Anhand der Lichtuhr kann man auch sehr leicht die Formel für die Zeitdilatation, also die Verlangsamung der Zeit, herleiten.

Für einen Beobachter im bewegten System legt der Lichtstrahl den Weg y' zwischen den Spiegeln senkrecht von unten nach oben mit der Lichtgeschwindigkeit c in der Zeit t' zurück: $y' = c \cdot t'$ (Grafik links). Für den außen stehenden, ruhenden Beobachter schreitet aber während der Laufzeit t' der Endpunkt der Reflexion, der obere Spiegel, mit der Geschwindigkeit v des bewegten Systems in x -Richtung, also um die Strecke $x = v \cdot t'$ fort. Dadurch verläuft der Lichtstrahl vom unteren zum oberen Spiegel vom ruhenden Beobachter aus gesehen nun schräg (Grafik Mitte). Seine Laufstrecke beträgt $s = c \cdot t$. Diesen Weg s durchläuft das Licht ebenfalls mit der Lichtgeschwindigkeit c , da c nicht vom Bewegungszustand abhängt. Die Addition (Grafik rechts) der Strecken y' und x ergibt s und bildet ein rechtwinkliges Dreieck, so dass sich der Satz des Pythagoras anwenden lässt: $(c \cdot t)^2 = (c \cdot t')^2 + (v \cdot t')^2$.

Löst man diese Gleichung nach der Zeit t auf, so erhält man das Ergebnis: $t = t' \sqrt{1 - (v/c)^2}$. Vom ruhenden Beobachter aus gesehen verlangsamt sich also der Zeitablauf im bewegten System um den Faktor $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$. Physiker sprechen von der Zeitdilatation. Diesen Faktor hatte schon Lorentz gefunden, als er die Verkürzung einer Messapparatur in Bewegungsrichtung relativ zum Äther annahm. Physiker nennen dies Lorentz-Transformation.

Dieser Umrechnungsfaktor zeigt deutlich, warum im Alltag alle Uhren ununterscheidbar gleich schnell gehen. Die Geschwindigkeiten sind im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit verschwindend klein, und damit ist der Bruch $(v/c)^2$ fast genau null. Erst im Bereich der Lichtgeschwindigkeit tritt ein merklicher Effekt auf (siehe Tabelle). Physikalisch bedeutet dies: Die Newton'sche Physik ist als Grenzfall für sehr kleine Geschwindigkeiten in der Speziellen Relativitätstheorie enthalten.