

dtv

Wie kam es, dass in einer bestimmten Phase der kosmischen Entwicklung Milliarden Sterne »angingen«, wie tickt das Uhrwerk, das sie dazu veranlasste? Warum glüht der Himmel nicht, obwohl doch das ganze Universum glüht – oder stimmt das gar nicht? Warum bewegt sich das Universum von uns fort? Warum haben Raum und Zeit einen Anfang und sind nicht ewig? Warum ist die Welt nicht fest umrissen und endgültig? Warum sind wir eigentlich hier und nicht woanders? Gibt es im All andere Wesen, und wenn ja, wer sind sie, und wo sind sie?

Die Suche nach der Formel, die das Universum erklärt, nach der »Theorie für Alles« ist der heilige Gral der Physik. Die brilliantesten Köpfe der Kosmologie befassen sich mit dieser Frage. Zu ihnen gehört unzweifelhaft Stephen Hawking. Er behandelt verschiedene Vorschläge dafür wie zum Beispiel die String-Theorie und Super-Gravitation. Er zeigt, dass nicht nur jeder Raum, sondern auch jede Zeit eine Form annimmt. Er pokert mit Newton und Einstein, befasst sich mit der Frage, ob Zeitreisen möglich sind, sowie mit anderen kühnen Spekulationen und bietet einen einzigartigen Einblick in die Welt der modernen Astrophysik und Kosmologie.

Stephen Hawking, geboren 1942, erfuhr im Alter von gerade 21 Jahren, dass er an ALS, an amyotropher Lateralsklerose litt, einer unheilbaren Krankheit, und dass er vermutlich nur noch wenige Jahre zu leben hätte. Doch er setzte seine mathematischen und physikalischen Studien fort. Er wurde Fellow an der Universität Cambridge, wo ihm freie Hand für seine Forschungen, vor allem seine einflussreichen Arbeiten über Schwarze Löcher, gewährt wurde. Seit 1979 ist er »Lucasischer Professor« für Mathematik im Fachbereich Angewandte Mathematik und Theoretische Physik in Cambridge, ein Lehrstuhl, der in der Mitte des 17. Jahrhunderts von dem Parlamentsmitglied Henry Lucas gegründet wurde und den kurz darauf Isaac Newton innehatte. Für seine Beiträge zur modernen Kosmologie hat Stephen Hawking zahlreiche Auszeichnungen erhalten. Er ist Mitglied der Royal Society und der US National Academy of Sciences. Viele weitere Informationen finden Sie auf seiner Website unter www.hawking.org.uk.

STEPHEN HAWKING

Das Universum
in der
Nussschale

Aus dem Englischen von Hainer Kober
Fachliche Beratung Markus Pössel

Deutscher Taschenbuch Verlag

INHALT

VORWORT 7

KAPITEL 1 – SEITE 11

EINE KURZE GESCHICHTE DER RELATIVITÄTSTHEORIE

Wie Einstein die Grundlagen für die beiden fundamentalen Theorien des 20. Jahrhunderts schuf – die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie



KAPITEL 2 – SEITE 37

DIE FORM DER ZEIT

Einsteins allgemeine Relativitätstheorie verlieh der Zeit eine Form. Wie sich das mit der Quantentheorie vereinbaren lässt



KAPITEL 3 – SEITE 75

DAS UNIVERSUM IN EINER NUSSSCHALE

Das Universum hat viele Geschichten, von denen jede durch eine winzige Nuss bestimmt wird.



KAPITEL 4 – SEITE 109

DIE ZUKUNFT VORHERSAGEN

Wie der Informationsverlust in Schwarzen Löchern unsere Fähigkeit beeinträchtigen könnte, die Zukunft vorherzusagen



KAPITEL 5 – SEITE 139

DIE VERGANGENHEIT SCHÜTZEN

*Sind Zeitreisen möglich?
Könnte eine fortgeschrittene Zivilisation in die
Vergangenheit reisen und sie verändern?*



KAPITEL 6 – SEITE 163

UNSERE ZUKUNFT: STAR TREK ODER NICHT?

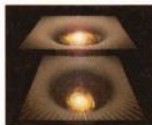
*Wie sich biologisches und elektronisches Leben
in immer schnellerem Tempo
zu wachsender Komplexität entfaltet*



KAPITEL 7 – SEITE 181

SCHÖNE NEUE BRANWELT

*Leben wir auf einer Bran,
oder sind wir einfach Hologramme?*



LEBEN IM UNIVERSUM 211

STEPHEN HAWKING – EINE PHYSIKALISCH-BIOGRAFISCHE SKIZZE 221

von Markus Pössel

ANHANG 248

*Glossar
Zum Lesen empfohlen
Abbildungsnachweis
Register*

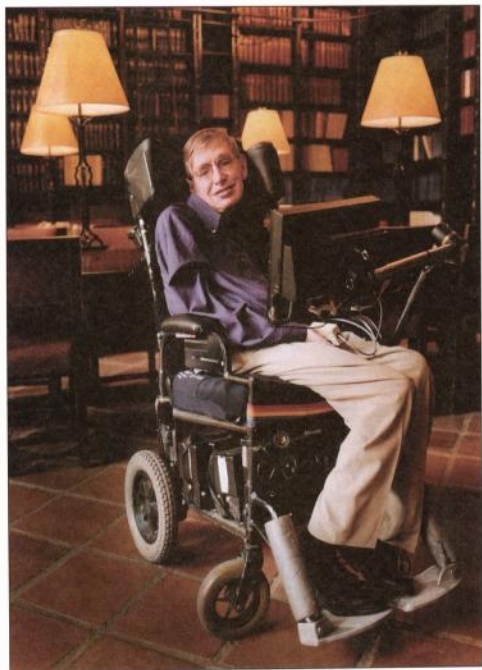




VORWORT

Stephen Hawking 2001

© Stewart Cohen





VORWORT

Nie hätte ich damit gerechnet, dass mein populärwissenschaftliches Buch *Eine kurze Geschichte der Zeit* ein solcher Erfolg werden würde. Mehr als vier Jahre stand es auf der Bestsellerliste der Londoner *Sunday Times*, länger als irgendein anderes Buch, was für ein Werk, das sich mit Wissenschaft befasst und nicht gerade zur leichten Kost zählt, recht bemerkenswert ist. Danach bin ich ständig gefragt worden, wann ich eine Fortsetzung zu schreiben gedächte. Das habe ich immer abgelehnt, weil ich keine Lust hatte, einen *Sohn der kurzen Geschichte* oder *Eine etwas längere kurze Geschichte der Zeit* zu schreiben. Doch im Laufe der Jahre kam mir ein Buch anderer Art in den Sinn, eines, das leichter zu verstehen ist. Die *Kurze Geschichte* war linear konzipiert, die meisten Kapitel bauten logisch auf den vorangehenden auf. Einigen Lesern gefiel das, aber andere blieben in den ersten Kapiteln stecken und kamen nie zu den interessanten Dingen, die in den späteren folgen. Im Gegensatz dazu gleicht das neue Buch in seinem Aufbau eher einem Baum: Die Kapitel 1 und 2 bilden den Stamm, von dem die anderen Kapitel abzweigen.

Die Äste sind ziemlich unabhängig voneinander und können nach dem zentralen Stamm in beliebiger Reihenfolge gelesen werden. Sie behandeln Gebiete, über die ich seit der Veröffentlichung der *Kurzen Geschichte* gearbeitet oder nachgedacht habe. So zeichnen sie ein Bild von einigen der aktivsten Felder gegenwärtiger Forschung. Auch innerhalb der Kapitel habe ich eine eingleisige, lineare Struktur zu vermeiden versucht. Die Abbildungen mit ihren Erläuterungen eröffnen einen alternativen Zugang zum Text, ähnlich wie in der 1996 erschienenen *Illustrierten kurzen Geschichte der Zeit*, während die Kästen und Einschübe Gelegenheit bieten, bestimmte Themen etwas ausführlicher zu behandeln als im Haupttext.

Als *Eine kurze Geschichte der Zeit* 1988 erstmals veröffentlicht wurde, schien sich die Weltformel, eine »Theorie für Alles«, am Horizont abzuzeich-

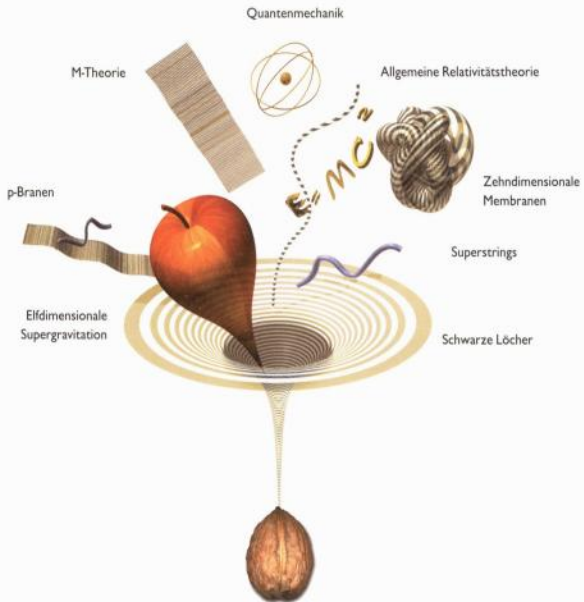


nen. Wie hat sich die Situation seither verändert? Sind wir unserem Ziel näher gekommen? Wie ich in diesem Buch erläutern werde, haben wir inzwischen große Fortschritte gemacht. Aber die Reise dauert noch an, und ein Ende ist nicht abzusehen. Man sagt, es sei besser, voller Hoffnung zu reisen als anzukommen. Unser Forschungsdrang beflügelt die Kreativität auf allen Gebieten, nicht nur in der Wissenschaft. Sollte es uns wirklich gelingen, den Bereich des Erforschbaren ganz zu durchmessen, würde der menschliche Geist verkümmern und sterben. Aber ich glaube nicht, dass es jemals Stillstand geben wird: Wenn nicht an Tiefe, so werden wir an Komplexität gewinnen und uns immer von einem expandierenden Horizont des Möglichen umgeben sehen.

Ich möchte dem Leser einen Eindruck von der Faszination der Entdeckungen verschaffen, die gegenwärtig gemacht werden, und von dem Bild der Wirklichkeit, das sich herauszukristallisieren beginnt. Damit das Gefühl der Unmittelbarkeit stärker zum Tragen kommt, konzentriere ich mich dabei auf Bereiche, in denen ich selbst gearbeitet habe. Die Einzelheiten dieser Arbeit sind sehr wissenschaftlich, doch ich glaube, die Ideen lassen sich in ihren Grundzügen ohne großen mathematischen Ballast mitteilen. Ich hoffe, es ist mir gelungen.

Ich hatte viel Hilfe bei diesem Buch. Mein Dank gilt insbesondere Thomas Hertog und Neel Shearer, die mich bei den Abbildungen, Beschriftungen und Kästen unterstützten, Ann Harris und Kitty Ferguson, die das Manuskript überarbeiteten (genauer: die Computerdateien, denn alles, was ich schreibe, ist elektronisch), und Philip Dunn von Book Laboratory und Moonrunner Design, die die Abbildungen kreierten. Darüber hinaus möchte ich jedoch all den Menschen danken, die es mir ermöglicht haben, ein weitgehend normales Leben zu führen und meine wissenschaftliche Tätigkeit fortzusetzen. Ohne sie hätte dieses Buch nicht geschrieben werden können.

Stephen Hawking
Cambridge, 2. Mai 2001



KAPITEL 1

EINE KURZE GESCHICHTE DER RELATIVITÄTSTHEORIE

*Wie Einstein die Grundlagen für die beiden fundamentalen Theorien
des 20. Jahrhunderts schuf – die allgemeine Relativitätstheorie
und die Quantentheorie*



Portrait Einstein



Albert Einstein™

LOW

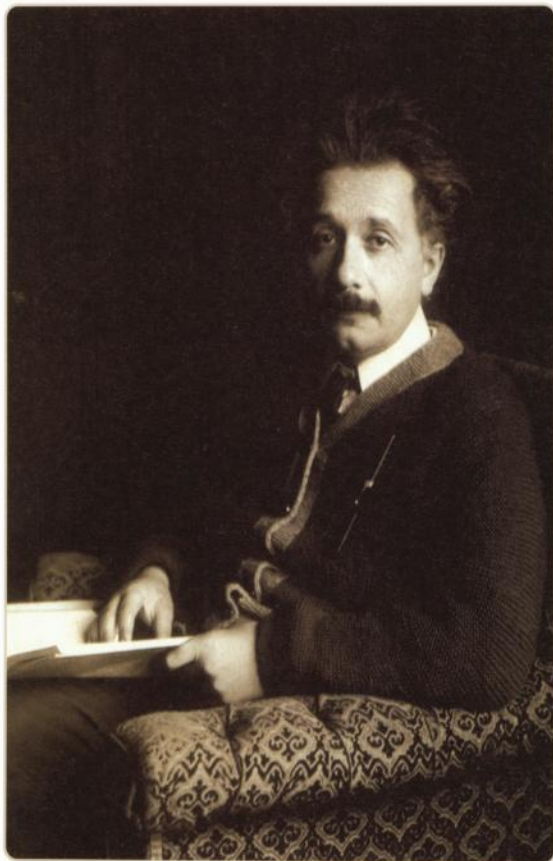


Albert Einstein, der Begründer der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie, wurde 1879 in Ulm geboren, aber schon im Jahr darauf zog die Familie nach München, wo der Vater Hermann und der Onkel Jakob eine kleine, nicht sehr erfolgreiche »Electrotechnische Fabrik« gründeten. Albert war kein Wunderkind, aber die Behauptung, er sei ein schlechter Schüler gewesen, ist schlicht falsch. 1894 geriet die väterliche Firma in die roten Zahlen, und die Familie zog nach Mailand, um ein neues Unternehmen aufzubauen. Auf Wunsch seiner Eltern blieb er in München, um die Schule zu beenden, aber sie war ihm zu autoritär. Daher verließ er sie nach wenigen Monaten ohne Abschluss und reiste der Familie hinterher. Später erwarb er an der Kantonsschule Aarau in der Schweiz die Hochschulreife, nahm dann das Studium am angesehenen Zürcher Polytechnikum – später umbenannt in Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) – auf und schloss es im Jahr 1900 ab. Sein Eigensinn und die Abneigung gegen jede Form von Autorität machten ihn bei den Professoren des Polytechnikums nicht gerade beliebt, und keiner von ihnen bot ihm einen Assistentenposten an, der im Regelfall den Zugang zur akademischen Laufbahn eröffnete. Zwei Jahre später trat er schließlich dank der Vermittlung eines Freundes eine bescheidene Stellung am Schweizerischen Patentamt in Bern an. Während er diesen Posten innehatte, schrieb er im Jahr 1905 drei Arbeiten, mit denen er sich einerseits als einer der bedeutendsten Wissenschaftler der Welt auswies und andererseits zwei theoretische Revolutionen auslöste – Revolutionen, die unser Verständnis von Zeit, Raum und Wirklichkeit grundlegend verändert haben.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts glaubten die Naturwissenschaftler, eine vollständige Beschreibung des Universums sei zum Greifen nah. Nach ihrer Vorstellung war der Raum mit einem kontinuierlichen Medium, dem »Äther«, angefüllt. Lichtstrahlen und die gerade entdeckten Radiowellen, so dachte man, seien Wellen in diesem Äther, so wie der Schallübertragung Druckwellen in der Luft zugrunde liegen. Um zu einer vollständigen Theorie zu gelangen, schien nur noch als letzter Schritt erforderlich zu sein, die elastischen Eigenschaften des Äthers sorgfältig zu messen. In Erwartung solcher Messungen wurde beispielsweise das Jefferson-Laboratorium an der Harvard University ganz ohne Eisennägel erbaut, um die empfindlichen magnetischen Messungen nicht zu beeinträchtigen. Allerdings vergaßen die Planer, dass die rotbraunen Ziegelsteine, aus denen das Labor und der größte Teil Harvards



Albert Einstein™



Albert Einstein 1920



(Abb. 1.1, oben)

THEORIE DES LICHTÄTHERS

Wäre Licht eine Welle in einem elastischen Stoff, dem Äther, müsste die Lichtgeschwindigkeit jemandem in einem Raumschiff A, das sich auf das Licht zu bewegt, höher erscheinen als einem Beobachter in einem Raumschiff B, das sich in die gleiche Richtung bewegt wie das Licht.

(Abb. 1.2, gegenüber)

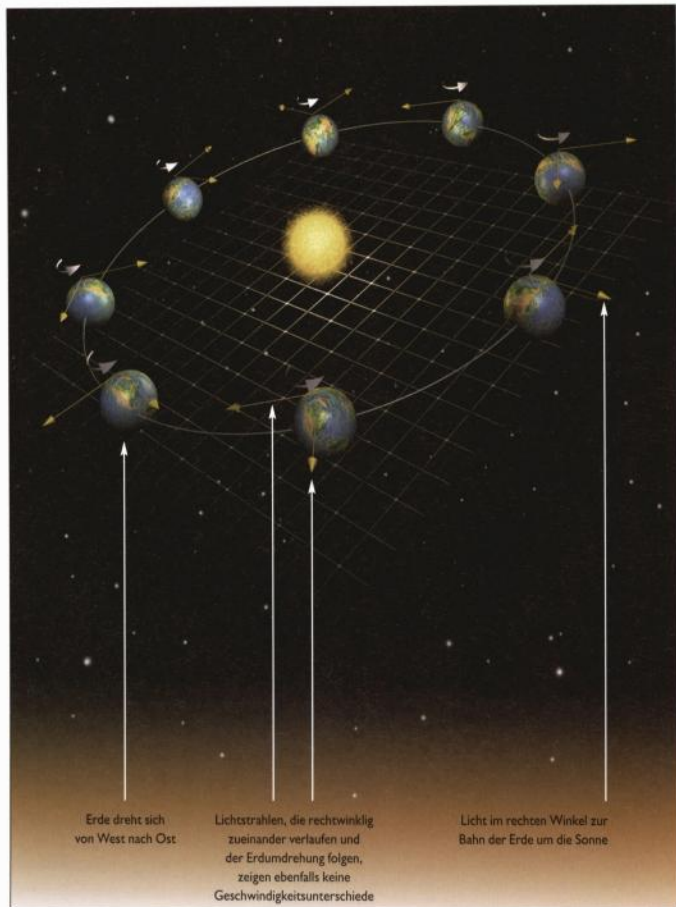
Man entdeckte keinen Unterschied zwischen der Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Erdbahn und in einer Richtung senkrecht dazu.

bestehen, große Mengen an Eisen enthalten. Das Gebäude wird heute noch benutzt, obwohl sich die Universitätsverwaltung nach wie vor nicht ganz sicher ist, wie viele Bücher ein Bibliotheksfußboden ohne Eisennägel tragen kann.

Kurz vor der Jahrhundertwende traten die Unstimmigkeiten, die der Idee eines alles durchdringenden Äthers innewohnten, allmählich zutage. Man erwartete, dass sich das Licht mit konstanter Geschwindigkeit im Äther ausbreitet, dass jedoch seine Bewegung einem Beobachter, der in der gleichen Richtung wie das Licht durch den Äther reiste, langsamer erscheinen müsste, während sie einem Beobachter, der dem Licht entgegenreiste, höher erschiene (Abb. 1.1).

Doch zahlreiche Experimente, die diese Auffassung bestätigen sollten, blieben ohne Erfolg. Entsprechende Messungen führten 1887 Albert Michelson und Edward Morley von der Case School of Applied Science in Cleveland, Ohio, durch. Sie verglichen die Lichtgeschwindigkeit in zwei Strahlen, die rechtwinklig zueinander verliefen. Während sich die Erde zum einen um ihre Achse drehte und sie zum anderen die Sonne umkreiste, hätte sich die Messapparatur mit wechselnder Geschwindigkeit und Orientierung durch den Äther bewegen müssen (Abb. 1.2). Doch Michelson und Morley fanden weder tägliche noch jährliche Unterschiede zwischen den beiden Lichtstrahlen. Es war, als breitere sich das Licht relativ zum Beobachter – wie schnell und in welcher Richtung auch immer er sich bewegte – stets mit der gleichen Geschwindigkeit aus (Abb. 1.3, S. 16).

Aufgrund des Michelson-Morley-Experiments gelangten der irische Physiker George Fitzgerald und der holländische Physiker Hendrik Lorentz zu dem Schluss, bei der Bewegung durch den Äther verkürzten sich materielle Körper. Dabei sei die Kontraktion so beschaffen, dass Experimente wie das von Michelson und Morley niemals Unterschiede in der Lichtgeschwindigkeit messen könnten, egal, wie sie sich relativ zum Äther bewegten. (Fitzgerald

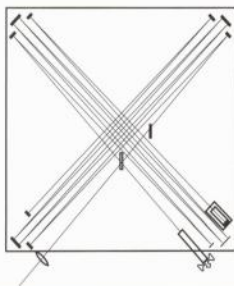




(Abb. 1.3) *MESSUNG VON UNTERSCHIEDEN IN DER LICHTGESCHWINDIGKEIT*

Im Michelson-Morley-Interferometer wird das Licht einer Quelle durch eine halb verspiegelte Glasscheibe in zwei Strahlen aufgeteilt. Das Licht der beiden Strahlen bewegt sich rechtwinklig zueinander und wird am Ende wieder zu einem einzigen Strahl vereint, indem es abermals zu der halb verspiegelten Scheibe gelenkt wird. Je nach Strahllänge und nach der Lichtgeschwindigkeit in den beiden Strahlen überlagern sich diese in unterschiedlicher Weise: Trifft Wellenberg auf Wellenberg, verstärken sich die Wellen gegenseitig, trifft Wellenberg auf Wellental, löschen sich die Teilstrahlen aus. Veränderungen, etwa der Übergang von Auslöschung zu Verstärkung, lassen sich beobachten und zeigen an, wenn die relative Lichtgeschwindigkeit in den Teilstrahlen variiert.

Rechts: Diagramm des Experiments nach der Abbildung, die 1887 im *Scientific American* erschien.





Auf der Uhr im Flugzeug, das nach Westen fliegt, verstreicht mehr Zeit als auf ihrem Zwillingsspendant, das in die entgegengesetzte Richtung fliegt.

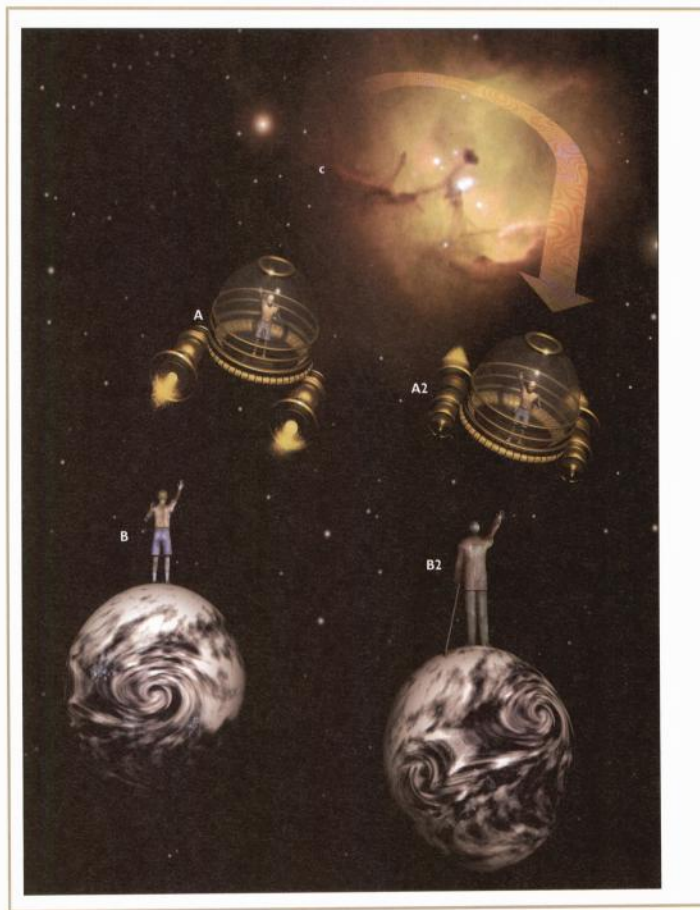
Die Zeit für die Passagiere in dem Flugzeug, das nach Osten fliegt, ist kürzer als für die Passagiere der Richtung Westen fliegenden Maschine.

und Lorentz hielten den Äther für eine reale Substanz.) Doch in einer Veröffentlichung vom Juni 1905 schrieb Einstein, der Begriff des Äthers erübrige sich, wenn man überhaupt nicht feststellen könne, ob man sich durch den Raum bewege oder nicht. Stattdessen ging er von dem Postulat aus, dem zufolge die Naturgesetze allen Beobachtern in freier Bewegung gleich erscheinen müssten. Insbesondere müssten sie alle die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen, egal, wie rasch sie sich bewegten. Die Lichtgeschwindigkeit sei unabhängig von der Bewegung der Beobachter und von der Ausbreitungsrichtung des Lichts stets dieselbe.

Das bedeutete allerdings den Verzicht auf die Vorstellung, es gäbe eine universelle Größe namens Zeit, die von allen Uhren in gleicher Weise gemessen würde. Stattdessen hätte jedermann seine eigene Zeit. Übereinstimmen würden die Zeiten zweier Menschen, wenn sich diese relativ zueinander in Ruhe befänden, nicht aber, wenn sie in relativer Bewegung wären.

Dieses Phänomen konnte in zahlreichen Experimenten nachgewiesen werden, etwa indem man zwei genau gehende Uhren in entgegengesetzter Richtung um die Erde flog, die bei der Landung der Maschinen leicht unterschiedliche Zeiten anzeigten (Abb. 1.4). Dieser Umstand könnte einen klugen Menschen auf die Idee bringen, er sollte, um länger zu leben, den Rest seiner Tage in stetem Flug gen Osten verbringen, so dass sich die Flugzeug-

(Abb. 1.4)
Eine Version des Zwillingsproblems (vgl. auch Abb. 1.5, S. 18) wurde experimentell überprüft, indem man zwei genau gehende Uhren in entgegengesetzter Richtung um die Erde fliegen ließ. Als sie sich wieder begegneten, zeigte die Uhr, die nach Osten geflogen war, etwas weniger Zeit an.



(Abb. 1.5, links)

DAS ZWILLINGSPROBLEM

In der Relativitätstheorie hat jeder Beobachter sein eigenes Zeitmaß. Das kann zum so genannten Zwillingsproblem führen.

Ein Zwilling A bricht zu einer Raumfahrt auf, in deren Verlauf er fast Lichtgeschwindigkeit erreicht (c), während der andere Zwilling B auf der Erde bleibt.

Infolge der Bewegung des Raumschiffs verstreicht die Zeit in ihm langsamer als für den auf der Erde gebliebenen Bruder.

Daher stellt der Raumreisende (A2) bei seiner Rückkehr fest, dass sein Bruder (B2) in höherem Maße als er selbst gealtert ist.

Obwohl es dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen scheint, lassen zahlreiche Experimente darauf schließen, dass in diesem Szenario der reisende Zwilling tatsächlich jünger wäre als der daheimgebliebene.

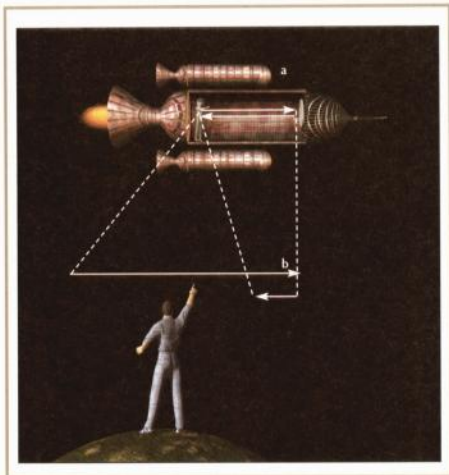
(Abb. 1.6, rechts)

Ein Raumschiff fliegt von links nach rechts mit vier Fünftel der Lichtgeschwindigkeit vorbei. Ein Lichtimpuls wird an einem Ende der Kabine emittiert und zum anderen Ende reflektiert (a).

Das Licht wird von Menschen auf der Erde und im Raumschiff beobachtet.

Infolge der Bewegung des Raumschiffs erzielen sie hinsichtlich der Entfernung, die das reflektierte Licht zurückgelegt hat, keine Einigung (b).

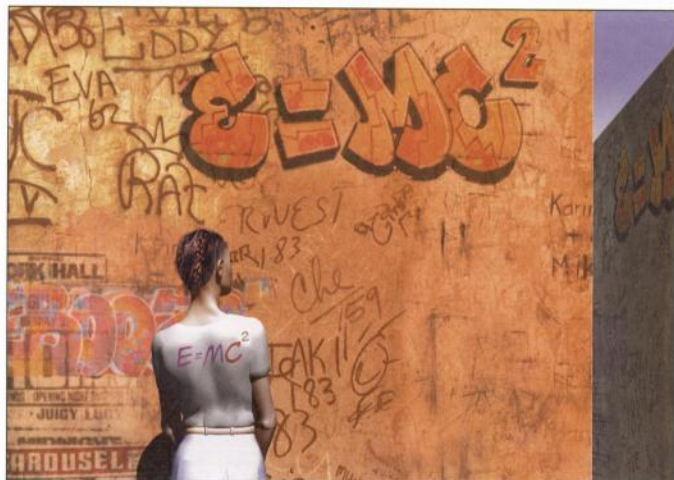
Sie müssen dann auch unterschiedlicher Meinung darüber sein, wie viel Zeit das Licht gebraucht hat – wenn wir Einsteins Postulat zugrunde legen, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle frei bewegten Beobachter gleich ist.



geschwindigkeit und die Erdrotation addierten. Allerdings würde der winzige Sekundenbruchteil Lebenszeit, den er gewönne, mehr als wettgemacht durch den Verzehr des Essens, das die Fluggesellschaften servieren.

Einsteins Postulat, wonach die Naturgesetze allen Beobachtern in freier Bewegung gleich erscheinen, bildete die Grundlage der Relativitätstheorie, die ihren Namen dem Umstand verdankt, dass ihr zufolge nur relative Bewegung von Bedeutung ist (Abb. 1.6). Ihre Schönheit und Einfachheit überzeugten viele Wissenschaftler, aber sie stieß auch auf allerlei Widerstände. Einstein hatte zwei »Absolute« des 19. Jahrhunderts entthront: die absolute Ruhe, die der Äther verkörpert, und die absolute oder universelle Zeit, die von allen Uhren in gleicher Weise gemessen wird. Viele Menschen fanden die Vorstellung beunruhigend: Bedeute dies, so fragten sie, dass alles relativ sei, dass es nun auch keine absoluten moralischen Maßstäbe mehr gebe? Dieses Unbehagen hielt bis in die zwanziger und dreißiger Jahre an. Als Einstein 1921 mit dem Nobelpreis geehrt wurde, erhielt er ihn nicht für seine Relativitätstheorie, sondern für eine Veröffentlichung, mit der er 1905 zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen hatte.

In der Begründung wurde die als zu kontrovers geltende Relativitätstheorie nicht einmal erwähnt. (Noch immer bekomme ich zwei bis drei Briefe



(Abb. 1.7)

$$E=mc^2$$



pro Woche, in denen ich darüber aufgeklärt werde, dass sich Einstein geirrt hat.) Heute findet die Relativitätstheorie allerdings rückhaltlose Zustimmung in der Gemeinschaft der Wissenschaftler, denn die aus ihr abgeleiteten Vorhersagen haben sich in zahllosen Experimenten und Anwendungen bestätigt.

Eine sehr wichtige Konsequenz der Relativitätstheorie ist die Beziehung zwischen Masse und Energie. Aus Einsteins Postulat, dem zufolge die Lichtgeschwindigkeit jedem Beobachter gleich erscheinen sollte, ergibt sich bei genauerer Betrachtung der Schluss, dass nichts schneller als das Licht sein kann. Wenn man Energie aufwendet, um irgendetwas – sei es ein Teilchen oder ein Raumschiff – zu beschleunigen, so wächst seine Masse an, was die weitere Beschleunigung erschwert. Das Teilchen auf Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen ist unmöglich, weil dazu eine unendliche Energiemenge erforderlich wäre. Masse und Energie sind äquivalent – so der Inhalt von Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ (Abb. 1.7). Dies ist wahrscheinlich die einzige physikalische Gleichung, der man auf der Straße begegnen kann. Zu ihren Konsequenzen gehörte die Erkenntnis, dass eine ungeheure Energiemenge freigesetzt wird, wenn sich der Kern eines Uranatoms in zwei Kerne mit etwas geringerer Gesamtmasse aufspaltet (vgl. Abb. 1.8, Seite 22/23).

Als sich 1939 ein neuer Weltkrieg abzeichnete, überredete eine Gruppe von