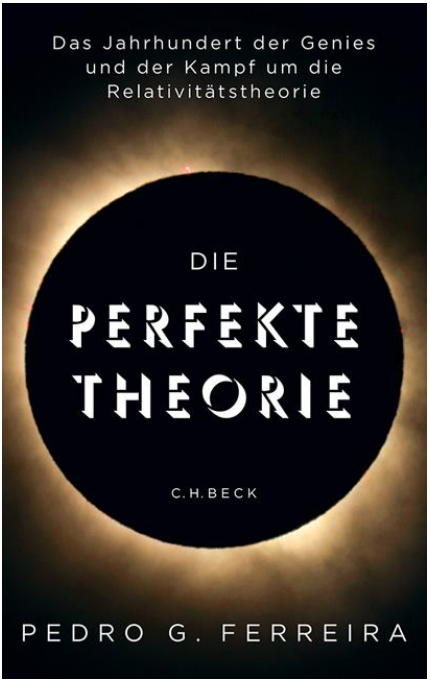
C.H.BECK
www.chbeck.de

Unverkäufliche Leseprobe



Pedro Ferreira
Die perfekte Theorie
Das Jahrhundert der Genies und der Kampf um die Relativitätstheorie

320 Seiten. Gebunden
ISBN: 978-3-406-66047-4

Weitere Informationen finden Sie hier:
http://www.chbeck.de/13106905

© Verlag C.H.Beck oHG, München

Kapitel 1

Wenn sich eine Person im freien Fall befindet

Im Herbst 1907 arbeitete Albert Einstein unter großem Druck. Man hatte ihn gebeten, für das *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* eine maßgebliche Zusammenfassung seiner Relativitätstheorie zu erstellen – keine leichte Aufgabe, denn die Frist war kurz und Einstein konnte sich nur in seiner Freizeit damit beschäftigen. Von Montag bis Freitag arbeitete er von 8.00 bis 18.00 Uhr im Schweizer Patentamt in Bern, im neu erbauten Post- und Telegrafengebäude, wo er Konstruktionszeichnungen neuartiger elektrischer Gerätschaften auf ihre Tauglichkeit prüfte. Sein Vorgesetzter hatte ihm eingeschärft: «Wenn Sie ein Gesuch zur Hand nehmen, dann denken Sie, es sei alles falsch, was der Erfinder sagt»,[1] und er nahm sich diesen Rat zu Herzen. Den größten Teil des Tages verbannte er die Notizen und Berechnungen für seine eigenen Theorien und Entdeckungen in sein «Büro für theoretische Physik», wie er die zweite Schublade seines Schreibtischs nannte.

Einsteins Text war als Rekapitulation seiner triumphalen Vermählung der klassischen Mechanik von Galileo Galilei und Isaac Newton mit den neuen Lehren der Elektrizität und des Magnetismus von Michael Faraday und James Clerk Maxwell gedacht. Sein Ziel war, eine Reihe merkwürdiger Auswirkungen der Theorie zu erläutern, die ihm im Lauf der Jahre aufgefallen waren – wie Uhren, die langsamer gehen, wenn sie bewegt werden, oder Gegenstände, die bei hoher Geschwindigkeit schrumpfen. Darüber hinaus erklärte der Text die seltsame, magische Gleichung, der zufolge Masse und Energie austauschbar sind,

sowie die Tatsache, dass sich nichts schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen kann. Nach dieser Abhandlung sollte sich fast die gesamte Physik durch ein neues, allgemeines Regelwerk beherrschen lassen.

Im Jahr 1905 hatte Einstein innerhalb weniger Monate eine Reihe von Publikationen verfasst, die in kurzer Zeit die Physik veränderten. Teil dieses kreativen Ausbruchs war die Erkenntnis, dass sich Licht – ähnlich wie Materiepartikel – wie Energiebündel verhielt. Das chaotische Zittern von Pollen und Staubteilchen in einer Schale voll Wasser hatte er mit der heftigen Bewegung schwingender und aneinanderstoßender Wassermoleküle erklärt. Und er war ein Problem angegangen, das Physiker beinahe ein halbes Jahrhundert geplagt hatte: Warum verhielten sich die physikalischen Gesetze verschieden, je nachdem, wie man sie betrachtete? Mit dem Relativitätsprinzip hatte er sie miteinander in Einklang gebracht.

All diese erstaunlichen Entdeckungen hatte er gemacht, während er als technischer Experte dritter Klasse im Schweizer Patentamt in Bern wissenschaftliche und technische Neuerungen prüfte. Im Jahr 1907 hatte er den ersehnten Sprung in die akademische Karriere noch immer nicht geschafft, und für jemanden, der gerade wichtige Grundregeln der Physik umgeschrieben hatte, wirkte Einstein ziemlich mittelmäßig. Beim Studium an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich war er allenfalls dadurch aufgefallen, dass er Vorlesungen, die ihn nicht interessierten, schwänzte und gelegentlich genau die Menschen gegen sich aufbrachte, die seine Begabung hätten fördern können. Ein Professor erklärte ihm: «Sie sind ein sehr gescheiter Junge, Einstein, ein ganz gescheiter Junge. Aber Sie haben einen großen Fehler: Sie lassen sich nichts sagen!»[2] Als sein Diplomvater die Betreuung eines selbst gewählten Themas verweigerte, lieferte Einstein eine lustlos zusammengeschriebene Arbeit ab, deren Note seine Aussicht auf eine Assistentenstelle am Polytechnikum oder an anderen Universitäten, bei denen er sich beworben hatte, zunichtemachte.

Vom Abschluss des Diploms 1900 bis zur Anstellung am Patentamt 1902 erlebte er beruflich eine Serie von Fehlschlägen. Zu allem Übel wurde seine 1901 an der Universität Zürich eingereichte Dissertation im folgenden Jahr abgelehnt. In dieser Arbeit hatte er sich zum Ziel gesetzt, einige von dem großen theoretischen Physiker des ausge-

henden 19. Jahrhunderts Ludwig Boltzmann vorgebrachte Gedanken zu widerlegen, aber Einsteins Bilderstürmerei wurde nicht gut aufgenommen. Erst im Jahr 1905 erlangte er mit seiner wegweisenden Arbeit über *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* den Doktorgrad. «Er [der Doktortitel] erleichtert den Verkehr mit den Menschen nicht unwesentlich nach meiner Erfahrung»,[3] wie ein neuerdings diplomatischer Einstein bemerkte.

Während sich Einstein weiterhin schwertat, kam sein Freund Marcel Grossman auf dem Weg zur Professorenwürde rasch voran. Er war zuverlässig, fleißig und bei seinen Lehrern beliebt und half Einstein mit seinen präzisen Vorlesungsmitschriften mehr als einmal aus der Patsche. Einstein, seine zukünftige Ehefrau Mileva Marić und Grossman schlossen beim gemeinsamen Studium in Zürich Freundschaft. Anders als Einstein machte Grossman anschließend rasch Karriere. Er wurde Hochschulassistent in Zürich und schloss 1902 seine Promotion ab. Nach einer kurzen Phase als Gymnasiallehrer wurde er Professor für darstellende Geometrie an der ETH. Einstein hatte nicht einmal eine Lehrerstelle bekommen. Erst durch Grossmans Vater, der ihn dem mit ihm befreundeten Leiter des Berner Patentamts empfahl, kam Einstein schließlich als Sachverständiger unter.

Die Anstellung im Patentamt war ein Segen. Nach Jahren der finanziellen Abhängigkeit vom Vater konnte er nun endlich Mileva heiraten und in Bern eine Familie gründen. Die monotone Arbeit im Patentamt mit ihren klar definierten Pflichten und wenigen Ablenkungsmöglichkeiten bot Einstein einen fast idealen Rahmen, um seinen Gedanken nachzugehen. Dazu hatte er genügend Zeit, denn die täglichen Pflichten ließen sich in wenigen Stunden erledigen. So saß er mit einigen Büchern und den Notizen aus dem «Büro für theoretische Physik» an seinem kleinen Schreibtisch und konstruierte Experimente im Kopf. In diesen Gedankenexperimenten stellte er sich Situationen und Apparaturen vor, mit denen sich physikalische Gesetze untersuchen ließen, um herauszufinden, was sie in der realen Welt wohl anstellen würden. Da er nicht über ein Labor verfügte, spielte er alles sorgfältig in Gedanken durch und inszenierte Vorgänge, die er dann wieder peinlich genau untersuchte. Seine mathematischen Kenntnisse reichten gerade aus, um die Ergebnisse zu Papier zu brin-

gen, wobei präzise ausgearbeitete wissenschaftliche Kleinode entstanden, die der Physik eine neue Richtung geben sollten.

Im Patentamt war man mit seiner Arbeit zufrieden und beförderte ihn bald zum technischen Experten zweiter Klasse. Niemand ahnte etwas von seinem wachsenden Ruhm. Er arbeitete sich noch immer täglich durch sein Pensum an Patentanträgen, als der deutsche Physiker Johannes Stark ihm 1907 den Auftrag für einen Essay *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen* erteilte. In zwei Monaten sollte die Arbeit vorliegen. Während dieser Zeit gelangte Einstein zu der Einsicht, dass sein Relativitätsprinzip noch unvollständig war. Er musste es noch einmal völlig überarbeiten, wenn es wirklich *allgemein* gültig sein sollte.

Der Aufsatz im *Jahrbuch* war als Zusammenfassung von Einsteins ursprünglichem Relativitätsprinzip gedacht. Diesem zufolge sollten die Gesetze der Physik in jedem Inertialsystem in gleicher Weise gelten. Die Grundidee dazu war nicht neu, sondern schon seit Jahrhunderten bekannt.

Die Gesetze der Physik und der Mechanik beschreiben, wie sich Dinge unter Einwirkung von Kräften bewegen, wie sie beschleunigt oder abgebremst werden. Im 17. Jahrhundert formulierte der englische Physiker und Mathematiker Isaac Newton hierzu eine Reihe von Gleichungen. Seine Bewegungsgesetze beschreiben, was geschieht, wenn zwei Billardkugeln zusammenstoßen, eine Kugel aus einem Gewehr abgefeuert oder ein Ball in die Luft geworfen wird.

Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, das sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt. Wenn Sie dieses Buch an einem festen Ort lesen – einem gemütlichen Stuhl in Ihrem Arbeitszimmer beispielsweise oder am Tisch in einem Café –, dann befinden Sie sich in einem Inertialsystem. Ein anderes klassisches Beispiel ist ein gleichmäßig schnell fahrender Zug ohne Sicht nach draußen. Wenn Sie in einem solchen sitzen und er seine Reisegeschwindigkeit erreicht hat, lässt sich nicht mehr feststellen, ob Sie sich bewegen. Grundsätzlich sollte sich zwischen zwei Inertialsystemen nicht unterscheiden lassen, selbst wenn sich das eine mit hoher Geschwindigkeit bewegt und das andere stillsteht. Misst man in einem Inertialsystem die Kräfte, die auf einen Gegenstand wir-

ken, dann sollte sich dasselbe Ergebnis ergeben wie in jedem anderen Inertialsystem. Die physikalischen Gesetze haben ihre Gültigkeit unabhängig vom Bezugssystem.

Im 19. Jahrhundert kam eine völlig neue Gruppe von Gleichungen hinzu, die zwei andere Naturkräfte zusammenbrachten – die Elektrizität und den Magnetismus. Zunächst erscheinen die beiden als völlig eigenständige Phänomene. Elektrizität kennen wir von der Beleuchtung zu Hause oder von den Blitzen am Himmel. Magnetismus dagegen lässt Magnete am Kühlschrank haften oder zieht die Kompassnadel nach Norden. Der schottische Physiker James Clerk Maxwell konnte jedoch zeigen, dass beide Kräfte als unterschiedliche Ausprägung einer einzigen Kraft – Elektromagnetismus – gesehen werden können. Wie sich diese Kraft darstellt, hängt davon ab, wie sich der Beobachter bewegt. Ein Mensch, der neben einem Stabmagneten sitzt, kann Magnetismus wahrnehmen, aber keine Elektrizität. Saust die Person aber mit hoher Geschwindigkeit vorbei, dann nimmt sie nicht nur Magnetismus, sondern auch ein bisschen Elektrizität wahr. Maxwell vereinte beide Naturkräfte zu einer einzigen, die unabhängig von der Position oder Geschwindigkeit des Beobachters denselben Wert annimmt.

Versucht man allerdings, Newtons Bewegungsgesetze und die maxwellschen Gleichungen für Elektromagnetismus zu kombinieren, dann ergeben sich Schwierigkeiten. Folgt die Welt tatsächlich beiden Gesetzen, dann müsste es prinzipiell möglich sein, aus Magneten, Drähten und Umlenkrollen eine Maschine zu bauen, die in einem Inertialsystem keine Kraft registriert, in einem anderen Inertialsystem hingegen wohl – ein klarer Verstoß gegen die Regel, dass Inertialsysteme nicht voneinander unterscheidbar sein sollten. Newtons Bewegungsgesetze und die maxwellschen Regeln sind also scheinbar nicht vereinbar. Einsteins Ziel war es, diese «Asymmetrien» in den physikalischen Gesetzen zu beheben.[4]

In den Jahren vor der Veröffentlichung von 1905 entwickelte Einstein das kurz gefasste Relativitätsprinzip mit Hilfe einer Reihe von Gedankenexperimenten, die dieses Problem lösen sollten. Er gelangte dabei zu zwei Postulaten. Das erste war im Grunde nur eine Neuformulierung des Prinzips, dass die Gesetze der Physik in jedem Inertialsystem dieselbe Form haben müssen. Das zweite Postulat war bereits radikaler: In *jedem* Inertialsystem hat die Lichtgeschwindigkeit denselben Betrag

von 299 792 Kilometern pro Sekunde. Mit diesen Postulaten ließen sich Newtons Bewegungsgesetze so anpassen und mit den maxwellschen Gleichungen für Elektromagnetismus kombinieren, dass Inertialsysteme nicht mehr zu unterscheiden waren. Damit hatte Einsteins neues Relativitätsprinzip verblüffende Resultate erbracht.

Für das zweite Postulat mussten die newtonschen Gesetze etwas verändert werden. Im klassisch-newtonschen Universum gilt bei Geschwindigkeiten das Additionsprinzip. Das Licht, das ein fahrender Zug nach vorn ausstrahlt, bewegt sich schneller als das einer stationären Quelle. In Einsteins Universum ist das nicht mehr der Fall. Stattdessen gilt eine kosmische Geschwindigkeitsbeschränkung von 299 792 Kilometern pro Sekunde. Selbst die stärkste Rakete kann diese Schranke nicht durchbrechen. Dies hat erstaunliche Auswirkungen. So wird jemand, der sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, langsamer altern, wenn er von jemandem beobachtet wird, der am Bahnsteig sitzt und den Zug vorüberfahren sieht. Und der fahrende Zug wird kürzer aussehen als der stehende. Die Zeit dehnt sich, der Raum zieht sich zusammen. Solche Effekte sind Anzeichen für etwas sehr Grundlegendes: In der Welt der Relativität sind Zeit und Raum miteinander verknüpft und wechselseitig austauschbar.

Es scheint, als habe Einstein die Physik mit seinem Relativitätsprinzip vereinfacht, allerdings mit kuriosen Auswirkungen. Als er sich im Herbst 1907 ans Schreiben machte, musste er sich jedoch eingestehen, dass seine Theorie zwar brauchbar war, aber nicht vollständig. So wie er sich die Relativitätstheorie vorstellte, passte Newtons Gravitationstheorie nicht hinein.

Vor Einstein war Isaac Newton in der Physik fast wie ein Gott verehrt worden. Sein Werk galt als höchste Ausprägung des menschlichen Geistes. Ende des 17. Jahrhunderts hatte er die auf sehr kleine wie auf sehr große Dinge wirkende Schwerkraft in einer einzigen einfachen Gleichung zusammengefasst. Damit ließ sich das Weltall genauso gut erklären wie Vorgänge im Alltagsleben.

Newtons Gesetz der allgemein wirkenden Schwerkraft oder das «(Quadrat-)Abstandsgesetz» könnte einfacher kaum sein. Es besagt, dass die Anziehungskraft zwischen zwei Objekten proportional zu der Masse

jedes Objektes und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes ist. Wird also die Masse eines Objekts verdoppelt, so verdoppelt sich auch die Anziehungskraft. Verdoppelt sich dagegen der Abstand der beiden Objekte, dann beträgt die Anziehungskraft nur noch ein Viertel. Mehr als zwei Jahrhunderte lang lieferte Newtons Gesetz zuverlässig Erklärungen für unzählige physikalische Phänomene. Besonders spektakulär war neben der Beschreibung der Umlaufbahnen der bekannten Planeten insbesondere die Vorhersage neuer Himmelskörper.

Seit Ende des 18. Jahrhunderts war an der Umlaufbahn von Uranus eine seltsame Unwucht aufgefallen. Die Astronomen hatten immer mehr Beobachtungsdaten gesammelt und die Bahn des Planeten im Raum immer genauer bestimmt. Dabei war die Vorhersage von Uranus' Umlaufbahn keineswegs leicht. Man ging zwar von Newtons Gravitationsgesetz aus, musste aber den Einfluss der anderen Planeten auf seine Bewegung berücksichtigen, hier und da Korrekturen anbringen, wobei der Orbit immer komplizierter wurde. Die Astronomen und Mathematiker veröffentlichten ihre Bahnberechnungen in Form von Tabellen, aus denen für bestimmte Tage und Jahre abzulesen war, wo am Himmel Uranus zu sehen sein musste. Verglichen sie ihre Vorhersagen mit tatsächlichen Himmelsbeobachtungen, dann blieb allerdings immer eine gewisse Abweichung, die sie nicht erklären konnten.

Der französische Astronom und Mathematiker Urbain Le Verrier besaß besonderes Geschick bei der Bestimmung und Berechnung der Umlaufbahnen der verschiedenen Planeten des Sonnensystems. Als er sich den Planeten Uranus vornahm, ging er aufgrund seiner Erfahrung mit anderen Planeten davon aus, dass Newtons Theorie vollkommen war. Wenn das der Fall war, dann musste da etwas anderes sein, das noch nicht berücksichtigt worden war. Und so wagte es Le Verrier, die Existenz eines bisher unbekannten Planeten vorherzusagen, für den er eine eigene astronomische Tabelle anfertigte. Zu seiner großen Freude richtete der deutsche Astronom Gottfried Galle sein Fernrohr auf die in Le Verriers Tabelle angegebene Stelle und entdeckte einen großen, unbekannten Planeten, der in seinem Gesichtsfeld schimmerte. In seinem Brief an Le Verrier schrieb er: «Monsieur, der Planet, dessen Position Sie bestimmt haben, existiert tatsächlich.»

Le Verrier war mit Newtons Theorie einen Schritt weiter gegangen

und dafür belohnt worden, denn jahrzehntelang war Neptun nur als *«Le Verriers Planet»* bekannt. Marcel Proust erwähnte Le Verriers Entdeckung in *Auf der Suche nach der verlorenen Zeit* als Beispiel für das Aufdecken von Korruption,[5] und Charles Dickens verdeutlichte an ihr in seiner Kurzgeschichte *The Detective Police* die Mühen der Kriminalarbeit.[6] Es war zweifellos eine besonders gelungene Nutzung der Regeln wissenschaftlicher Deduktion. Le Verrier sonnte sich in seinem Erfolg und wandte sich dann Merkur zu – auch dieser folgte offenbar einer merkwürdigen, unerwarteten Umlaufbahn.

Der newtonschen Schwerkraft zufolge kreist ein einzelner Planet in einem einfachen, geschlossenen und etwas verformten Kreis um die Sonne, in einer sogenannten Ellipse. Er kreist und kreist stets auf derselben Bahn und kommt der Sonne dabei abwechselnd näher und entfernt sich wieder. Der sonnennächste Punkt der Umlaufbahn – das *Perihel* – bleibt über die Zeit konstant. Manche Planeten, beispielsweise die Erde, haben fast kreisförmige Umlaufbahnen, und die Ellipse des Orbits ist kaum verformt. Andere Planeten, wie der Merkur, haben deutlich elliptischere Umlaufbahnen.

Obwohl Le Verrier den Einfluss aller anderen Planeten auf die Bahn des Merkur rechnerisch berücksichtigt hatte, hielt sie sich nicht an das newtonschen Gravitationsgesetz: Das Perihel wanderte um etwa 40 Bogensekunden pro Jahrhundert. (Eine Bogensekunde ist eine Einheit der Winkelmessung; der gesamte Himmelskreis misst etwa 1,3 Millionen Bogensekunden oder 360 Grad.) Diese als *Präzession des Merkurperihels* bekannte Anomalie konnte nicht mit Newtons klassischer Mechanik erklärt werden. Es musste noch etwas anderes im Spiel sein.

Wieder nahm Le Verrier an, dass Newton recht haben musste, und ging davon aus, dass es sehr nahe an der Sonne noch einen weiteren Planeten etwa von der Größe Merkurs geben musste: Vulcan. Dies war eine kühne, sehr unwahrscheinliche Mutmaßung, über die Le Verrier selbst sagte: «Wie könnte ein äußerst heller und immer in Sonnennähe befindlicher Planet während einer totalen Sonnenfinsternis übersehen worden sein?»[7]

Le Verriers Vermutung war das Startsignal zu einem Wettrennen um die Entdeckung des neuen Planeten Vulcan. In den folgenden Jahrzehnten gab es immer wieder Meldungen über in Sonnennähe gesich-

tete Objekte, aber keine Beobachtung erwies sich als stichhaltig. Die Suche nach Vulcan endete nicht mit Le Verriers Tod und die Präzession des Merkurperihels blieb den Astronomen im Gedächtnis. Statt eines unsichtbaren Planeten musste sich eine andere Erklärung für die Abweichung von 40 Bogensekunden finden lassen.

Bei den Gedanken, die sich Einstein 1907 über die Schwerkraft machte, ging es darum, Newtons Theorie mit seinem eigenen Relativitätsprinzip in Einklang zu bringen. Dass damit auch die Erklärung des Merkurorbits anstand, war zumindest ein Hintergedanke – was die Sache nicht einfacher machte.

Newtons Erklärung der Schwerkraft verstieß gegen beide Postulate von Einsteins Relativitätsprinzip. Zum einen ist die Wirkung der Schwerkraft nach Newton unmittelbar. Befinden sich zwei Objekte plötzlich nahe beieinander, dann wirkt die Anziehungskraft sofort zwischen ihnen – sie muss nicht erst von einem Objekt zum anderen wandern. Aber wie ist das möglich, wenn sich nach dem Relativitätsprinzip nichts, weder ein Signal noch eine Wirkung, schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann? Ebenso bedeutsam wie irritierend war die Tatsache, dass Einstein bei der Vereinheitlichung von Mechanik und Elektromagnetismus Newtons Gravitationsgesetz nicht berücksichtigen konnte. Die newtonsche Schwerkraft variierte je nach Inertialsystem.

Den ersten Schritt zur Lösung des Gravitationsproblems und hin zur allgemeinen Relativitätstheorie machte Einstein – in Gedanken – eines Tages an seinem Schreibtisch im Patentamt in Bern. Jahre später erinnerte er sich an die Idee, die zu seiner Gravitationstheorie führte: «Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, dann spürt sie ihr eigenes Gewicht nicht.»[8]

Stellen Sie sich vor, Sie wären Alice im Wunderland, die ins Kaninchenloch fällt, und nichts könnte Sie aufhalten. Ihre Geschwindigkeit wird unter dem Einfluss der Schwerkraft stetig zunehmen. Da die Beschleunigung dabei genau der wirkenden Schwerkraft entspricht, werden Sie keinerlei Kräfte – sei es Zug oder Druck – verspüren, auch wenn Ihnen die immer schnellere Bewegung einen gehörigen Schrecken einjagen dürfte. Stellen Sie sich nun einige Gegenstände vor, die mit Ihnen fallen, ein Buch, eine Teetasse und ein ebenso erschrockenes weißes

Kaninchen. Sie alle werden ebenso stark beschleunigen, um die wirkende Schwerkraft auszugleichen, und daher mit Ihnen im Fallen zusammen schweben. Wollen Sie anhand der Bewegung dieser Gegenstände relativ zu Ihnen selbst die wirkende Schwerkraft experimentell bestimmen, so werden Sie scheitern. Sie werden sich schwerelos fühlen und die Gegenstände werden schwerelos wirken. All dies deutet auf eine enge Beziehung zwischen Beschleunigung und Schwerkraft hin, die sich in diesem Fall gegenseitig aufheben.

Vielleicht gehen wir mit dem freien Fall einen Schritt zu weit. Um Sie herum passiert zu viel; der Wind zerrt an ihnen und die Angst, schließlich am Boden aufzuschlagen, hilft nicht gerade, klar zu denken. Beginnen wir lieber etwas einfacher und geruhsamer. Stellen wir uns vor, dass Sie gerade den Fahrstuhl im Erdgeschoss eines hohen Gebäudes betreten haben. Der Fahrstuhl fährt nach oben, und während der ersten Sekunden, in denen er beschleunigt, fühlen Sie sich ein bisschen schwerer. Nehmen wir umgekehrt an, Sie seien ganz oben im Gebäude und der Fahrstuhl setzt sich nach unten in Bewegung. Während der Aufzug in den ersten Augenblicken Fahrt aufnimmt, fühlen Sie sich leichter. Erreicht die Kabine dann ihre normale Fahrgeschwindigkeit, dann fühlen Sie sich natürlich weder schwerer noch leichter. Ganz zu Anfang aber, während der Aufzug beschleunigt, ist ihr Gefühl für das eigene Gewicht, und mithin der Schwerkraft, beeinträchtigt. In anderen Worten, ihre Wahrnehmung der Schwerkraft hängt völlig davon ab, ob Sie aufwärts oder abwärts beschleunigt werden.

Als sich Einstein an jenem Tag des Jahres 1907 den Menschen im freien Fall dachte, kam er einer Verbindung zwischen der Schwerkraft und der Beschleunigung auf die Spur, die entscheidend für die Eingliederung der Schwerkraft in seine Relativitätstheorie sein sollte. Wenn er diese so abwandelte, dass die Gesetze der Mechanik nicht nur in gleichförmig bewegten, sondern auch aufwärts oder abwärts beschleunigten Systemen galten, dann sollte es gelingen, die Schwerkraft mit dem Elektromagnetismus und der Mechanik zusammenzubringen. Wie das gehen sollte, wusste er nicht, aber diese Erkenntnis war der erste Schritt hin zu einer umfassenderen Relativitätstheorie.

Auf Druck des Herausgebers des Jahrbuchs vollendete Einstein seinen Aufsatz *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen*

Folgerungen und fügte ihm ein Kapitel über die Konsequenzen an, wenn er sein Prinzip auf die Gravitation ausdehnte. Dann würde die Schwerkraft die Lichtgeschwindigkeit ändern und Uhren langsamer gehen lassen. Überdies könnten die Auswirkungen des verallgemeinerten Relativitätsprinzips sogar die geringe Abweichung des Merkurorbits erklären. Diese beiden am Ende des Essays eingestreuten Vermutungen waren geeignet, Einsteins Idee in der Praxis zu erproben, aber sie mussten zuerst sorgfältig und in allen Einzelheiten ausgearbeitet werden. Doch vorerst war dazu keine Zeit, und Einstein sollte für mehrere Jahre nicht an der Relativitätstheorie weiterarbeiten.

Mit dem Jahr 1907 neigte sich Einsteins Wirken im Verborgenen dem Ende zu. Seine Veröffentlichungen von 1905 hatten die Runde gemacht und er erhielt nun regelmäßig Briefe von berühmten Physikern, die seine Ideen diskutierten und um Sonderdrucke baten. Erfreut über diese Entwicklung, berichtete Einstein einem Freund: «Meine Arbeiten finden viel Würdigung und geben Anlaß zu weiteren Untersuchungen.»[9] Ein Bewunderer scherzte: «Ich muß Ihnen offen sagen, daß ich mit Staunen gelesen habe, daß Sie 8 Stunden am Tage in einem Bureau sitzen müssen! Es gibt oft einen Treppenwitz in der Geschichte!»[10] Dabei führte Einstein kein schlechtes Leben. Durch die Stelle in Bern hatte er mit Mileva eine Familie gründen können, und 1904 war der Sohn Hans Albert geboren worden. Die Arbeitszeit am Patentamt ließ ihm sogar Zeit, zu Hause Spielzeug für seinen kleinen Sohn zu bauen, aber Einstein war bereit, in die akademische Welt zu wechseln.

Im Jahr 1908 wurde er endlich Privatdozent an der Universität Bern und konnte fortan für zahlende Studenten Vorlesungen halten. Das Unterrichten fand er aber sehr beschwerlich, was sich schnell in seinem Ruf als Dozent niederschlug. Dennoch folgte er 1909 einer Berufung als außerordentlicher Professor an die Universität Zürich. Dort blieb er allerdings wenig länger als ein Jahr, denn 1911 trug man ihm eine Stelle als ordentlicher Professor an der deutschsprachigen Prager Universität an – ohne Lehrverpflichtung. So fand er fern von der Hektik universitärer Lehrverpflichtungen wieder zu einem Geisteszustand zurück, wie ihn auch die geordnete und isolierte Umgebung des Berner Patentamts ermöglicht hatte. Nun konnte er sich wieder Gedanken über die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie machen.

Kapitel 2

Der wertvollste Fund

Seinem Freund und Kollegen, dem Physiker Otto Stern, vertraute Albert Einstein einmal an: «Wissen Sie, wenn man zu rechnen anfängt, b'scheisst man unwillkürlich.»[1] Schon in der Schule hatte er in Mathematik geglänzt und wusste sie für seine Zwecke zu nutzen. Seine Veröffentlichungen boten eine ausgewogene Mischung aus physikalischem Denken und gerade so viel Mathematik, wie als Grundlage nötig war. Seine Vorhersagen von 1907 bezüglich der allgemeinen Relativitätstheorie waren in mathematischer Hinsicht allerdings äußerst dürftig – einer seiner Züricher Professoren nannte die Präsentation der Arbeit «mathematisch umständlich».[2] Einstein verachtete die Mathematik als «überflüssige Gelehrsamkeit»[3] und spottete: «Seit die Mathematiker über die Relativitätstheorie hergefallen sind, verstehe ich sie selbst nicht mehr.»[4] Aber als er sich 1911 seinen Essay wieder vornahm, erkannte er, dass er seine Ideen mit Hilfe der Mathematik noch etwas weiter voranbringen könnte.

Wieder dachte er im Zusammenhang mit dem Relativitätsprinzip über das Licht nach. Stellen Sie sich vor, Sie reisen fern von Planeten und Sternen mit einem Raumschiff durch das All. Angenommen, ein Lichtstrahl von einem weit entfernten Stern tritt durch ein kleines Fenster zu Ihrer Rechten ein, wandert durch das Raumschiff und verlässt es wieder durch ein Fenster zur Linken. Wenn Ihr Raumschiff stillsteht und das Licht direkt auf das Fenster trifft, dann wird es durch das Fenster links von Ihnen wieder austreten. Bewegt sich das Raumschiff beim Eintritt des Lichtstrahls dagegen sehr schnell, aber mit konstanter Ge-

schwindigkeit, dann hat sich das Raumschiff ein Stück weiterbewegt, wenn der Lichtstrahl die andere Seite der Kabine erreicht, und das Licht wird durch ein Fenster weiter hinten ins Freie treten. Von Ihrem Gesichtspunkt aus tritt das Licht unter einem Winkel in die Kabine ein und durchquert sie in einer geraden Linie. Ganz anders sieht es aus, wenn das Raumschiff *beschleunigt:* Dann *biegt* sich der Lichtstrahl in der Kabine und tritt weiter hinten wieder ins Freie.

Hier kommt Einsteins Erkenntnis über die Natur der Schwerkraft ins Spiel. Eigentlich sollte sich die Wirkung der Schwerkraft in einem beschleunigenden Raumschiff nicht anders anfühlen als in einem ruhenden, denn Beschleunigung lässt sich nicht grundsätzlich von Gravitation unterscheiden. Jemand, der im Raumschiff sitzt, während es an der Oberfläche eines Planeten steht, muss dasselbe sehen wie der Passagier eines beschleunigenden Raumschiffs: einen Lichtstrahl, der durch die Schwerkraft gebogen wird. Einstein begriff, anders gesagt, dass die Schwerkraft das Licht genau so ablenkt wie eine Linse.

Die Gravitationskraft musste natürlich ziemlich stark sein, um eine sichtbare Ablenkung zu bewirken. Die Anziehung eines Planeten genügte möglicherweise nicht. Einstein schlug folgenden einfachen Test vor – an einem sehr viel massereicheren Objekt: Die Sonne sollte das Licht entfernter Sterne in ihrer Nähe messbar ablenken. Wenn die Sonne vor ihnen vorbeiwanderte, sollte sich ihre Winkelposition um den winzigen Betrag von etwa einem viertausendstel Grad ändern – eine fast unmerkliche Abweichung, die mit den damaligen Teleskopen aber durchaus messbar war. Da die entfernten Sterne neben der hellen Sonne unmöglich genau auszumachen waren, musste ein solches Experiment allerdings während einer totalen Sonnenfinsternis erfolgen.

Nun hatte Einstein zwar eine Möglichkeit gefunden, die Gültigkeit seiner neuen Ideen zu testen, aber mit der Theorie selbst kam er nicht richtig voran. Noch immer hing alles an seiner Idee aus dem Patentamt mit dem Menschen im freien Fall. Und obwohl er frei von Lehrverpflichtungen war und alle Zeit der Welt hatte, um seine Gedankenexperimente durchzuführen und sich noch mehr in seine Theorie zu vertiefen, war er nicht glücklich. Seine Familie war inzwischen gewachsen. Kurz vor der Ankunft in Prag war der zweite Sohn Eduard geboren worden, aber Einsteins Frau war unzufrieden und fühlte sich fern der

gewohnten Umgebung in Bern und Zürich einsam. Schon 1912 packte Einstein die erste Gelegenheit beim Schopf und kehrte als Professor an der ETH nach Zürich zurück.

In Prag war Einstein klar geworden, dass er zum Erforschen seiner Ideen eine neue Art von Sprache brauchte. Die eleganten physikalischen Gedanken, die er zu einem Ganzen fügen wollte, sollten nicht hinter schwer verständlichen mathematischen Formeln verschwinden. So wandte er sich wenige Wochen nach der Rückkehr nach Zürich an seinen alten Freund Marcel Grossman und flehte: «Du musst mir helfen, sonst werd' ich verrückt.»[5] Grossman hielt nicht allzu viel von der nachlässigen Weise, wie Physiker ihre Probleme angingen, sagte dem Freund aber seine Hilfe zu.

Einstein beschäftigte sich mit Objekten, die beschleunigt wurden oder auf die die Schwerkraft einwirkte. Sie bewegten sich auf gebogenen Bahnen durch den Raum, nicht entlang von geraden Linien wie in Inertialsystemen. Einfache Geometrie genügte nicht, um diese komplizierten Bewegungen zu beschreiben. Grossman gab Einstein ein Lehrbuch über nichteuklidische oder riemannsche Geometrie (heute als Differentialgeometrie bekannt).

Fast ein Jahrhundert bevor sich Einstein mit dem Relativitätsprinzip auseinanderzusetzen begann, hatte der deutsche Mathematiker Carl Friedrich Gauß es gewagt, die Grenzen der euklidischen Geometrie zu durchbrechen. Bis heute lernen wir in der Schule euklidische Geometrie. Sie besagt, dass sich parallele Linien niemals schneiden und dass sich zwei Geraden höchstens einmal kreuzen. Wir lernen, dass die Summe der Winkel im Dreieck 180 Grad beträgt und Quadrate vier rechte Winkel haben – alles in allem eine ganze Menge Regeln, die sich auf flachem Papier oder an der Schultafel darstellen lassen und für die es praktische Anwendungen gibt.

Wenn wir aber nun auf gewölbtem Papier arbeiten sollen? Was passiert, wenn wir unsere geometrischen Objekte auf der Oberfläche eines Basketballs zeichnen? Dann versagen unsere einfachen Regeln. Zeichnen wir beispielsweise zwei Linien, die im rechten Winkel vom Äquator ausgehen, dann sollten sie parallel zueinander sein. Das sind sie auch, aber wenn wir ihnen folgen, dann treffen sie an einem der Pole aufein-

ander. Wir können weitergehen und die Linien so weit voneinander entfernt am Äquator beginnen lassen, dass sie sich am Pol im rechten Winkel schneiden. Damit haben wir ein Dreieck mit einer Winkelsumme von 270 statt 180 Grad konstruiert. Erneut haben die üblichen Regeln für Dreiecke keine Gültigkeit.

So hat jede eindeutig konturierte Oberfläche – sei es eine Kugel, ein Ring oder ein zerknülltes Blatt Papier – ihre eigene Geometrie mit ihren eigenen Regeln. Gauß beschäftigte sich mit den Regeln für die Geometrie einer *beliebigen* Oberfläche und vertrat ganz demokratisch die Ansicht: Alle Oberflächen sind gleichwertig und gehorchen allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten. Die gaußsche Geometrie war ebenso leistungsfähig wie schwierig. Sein Schüler, der Mathematiker Bernhard Riemann, entwickelte sie in den 1850er Jahren zu einem eigenen Teilgebiet der Mathematik, das so kompliziert war, dass selbst Grossman, der Einstein in diese Richtung gewiesen hatte, die Ansicht vertrat, Riemann könnte darin zu weit gegangen sein. Die riemannsche Geometrie war ein Durcheinander unzusammenhängender Funktionen in einem fürchterlich nichtlinearen Grundgerüst, aber sie eröffnete Möglichkeiten. Wenn Einstein sie in den Griff bekam, dann konnte er seine Theorie vielleicht meistern.

Die neue Geometrie war höllisch kompliziert, aber Einstein, der bei der Generalisierung seiner Relativitätstheorie in einer Sackgasse steckte, machte sich an die Arbeit. Es war eine ungeheure Herausforderung, so als lerne man Sanskrit von Grund auf, um dann einen Roman damit zu schreiben.

Anfang 1913 hatte sich Einstein die neue Geometrie angeeignet und arbeitete mit Grossman an zwei Publikationen, die seinen Entwurf der Theorie beschreiben sollten. «Die Gravitationsangelegenheit ist zu meiner vollen Zufriedenheit geklärt», verriet er einem Kollegen.[6] Die Theorie war in der Ausdrucksweise der neuen Mathematik formuliert und enthielt Einsteins frühe Vorhersagen. Grossman steuerte ein Kapitel bei, um der möglicherweise unkundigen Gemeinschaft der Physiker die neue Geometrie nahezubringen. Einstein war es gelungen, fast allen physikalischen Gesetzen in jedem beliebigen Bezugssystem, nicht nur in einem unbeschleunigten Inertialsystem, die gleiche Form zu geben. Den Elektromagnetismus und Newtons Bewegungsgesetze beschrieb er

genauso wie in seiner ersten, speziellen Relativitätstheorie. Die einzige Ausnahme davon bildete weiterhin die Gravitation. Das neue von Einstein und Grossman vorgeschlagene Gravitationsgesetz fiel noch immer aus der Reihe und ging nicht im allgemeinen Relativitätsprinzip auf, obwohl Einstein seine physikalische Intuition eigens zu diesem Zweck mit der neuen Mathematik unterfüttert hatte. Dennoch war Einstein davon überzeugt, dass er einen wichtigen Schritt in die richtige Richtung getan hatte und für die Vollendung der Theorie nur noch ein paar offene Probleme lösen musste. Hier irrte er sich. Der restliche Weg zu seiner Theorie der Raumzeit sollte kein kurzer Sprint werden, sondern eher ein mühsames Stolpern.

[…]

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de