

*„Das Aufgeben gewisser bisher als fundamental behandelter Begriffe über Raum, Zeit und Bewegung darf nicht als freiwillig aufgefasst werden, sondern nur als bedingt durch beobachtete Tatsachen.“*

Albert Einstein [53]

*„Die allgemeine Relativitätstheorie verdankt ihre Entstehung in erster Linie der Erfahrungstatsache von der numerischen Gleichheit der trägen und der schweren Masse der Körper, für welche fundamentale Tatsache die klassische Mechanik keine Interpretation geliefert hat.“*

Albert Einstein [ebd.]

In Kapitel 8 haben wir herausgearbeitet, dass die Postulate der speziellen Relativitätstheorie zu einem völlig neuen Verständnis von Raum und Zeit führen. Doch so faszinierend diese Theorie auch ist: Einstein war mit ihr von Anfang an nicht ganz zufrieden. Um die Beweggründe zu verstehen, versetzen wir uns in Gedanken an den Anfang dieses Buchs zurück und rekapitulieren, auf welchem geistigen Konstrukt die spezielle Relativitätstheorie beruht. Einstein entwickelte sie aus der festen Überzeugung heraus, dass nur feststellbaren Tatsachen eine physikalische Realität zugeschrieben werden kann, und strich die Vorstellung eines absoluten Raums konsequent aus dem physikalischen Weltbild heraus. Das Ergebnis ist uns bekannt: Einstein war es gelungen, eine Tür in eine völlig neue Welt zu öffnen, in der Raum und Zeit zu einer harmonischen Einheit verschmolzen sind.

Aber ist der absolute Raum in der speziellen Relativitätstheorie wirklich gänzlich eliminiert? Zunächst erinnern wir uns daran, dass sich die spezielle Relativitätstheorie auf die Untersuchung bestimmter Bezugssysteme beschränkt, die wir als Inertialsysteme bezeichnet haben. Diese Bezugssysteme sind nach dem lateinischen Wort *Inertia* benannt, das Trägheit bedeutet. Genau diese Eigenschaft hatten wir auch zur Definition dieser Systeme herangezogen: Inertialsysteme sind Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz der Mechanik gilt.

Einstein war bewusst, dass er mit der Entscheidung, das Trägheitsprinzip mit dem Relativitätsprinzip in direkter Weise zu kombinieren, in eine begriffliche Falle lief; in

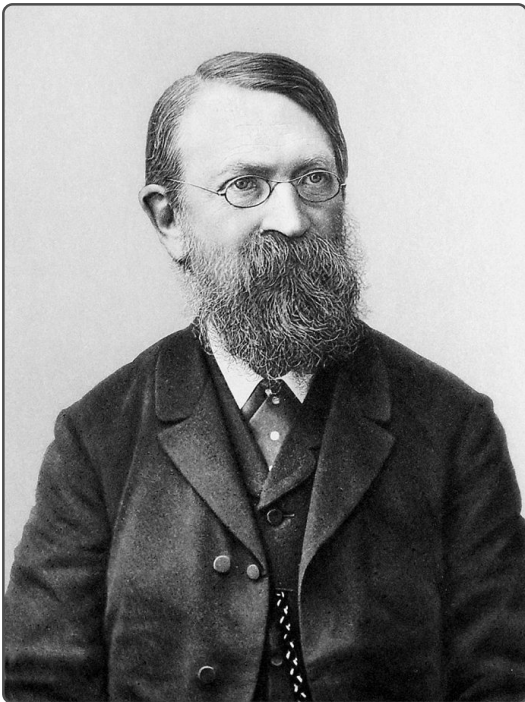


Abbildung 9.1

ERNST MACH  
1838 – 1916

*Dr Ernst Mach*

eine Falle, auf die der österreichische Physiker und Philosoph Ernst Mach bereits viele Jahre zuvor im Rahmen seiner kritischen Auseinandersetzung mit dem Newton'schen Weltbild hingewiesen hatte (Abbildung 9.1). Auf Einstein übte die Arbeit von Mach einen so großen Einfluss aus, dass wir sie mit Recht als die philosophische Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie auffassen dürfen. Ihr Herzstück ist das *Mach'sche Prinzip*, dessen Inhalt wir in groben Zügen offenlegen wollen.

## 9.1 Das Mach'sche Prinzip

Um den Kerngedanken des Mach'schen Prinzips aufzudecken, wollen wir dessen Schöpfer selbst das Wort erteilen. Die folgenden Zeilen stammen aus einem Vortrag, den Ernst Mach am 15. November 1871 vor der königlich-böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften in Prag gehalten hat. Sie machen deutlich, was den großen Vordenker dazu bewegte, den Begriff der Trägheit in seiner althergebrachten Form abzulehnen:

*„Seit Newton hat nun das Trägheitsgesetz, welches bei Galilei noch eine bloße Bemerkung ist, die Würde und Unantastbarkeit eines päpstlichen Ausspruchs. Man kann dasselbe vielleicht am besten so aussprechen: Jeder Körper behält seine Richtung und Geschwindigkeit bei, so lange dieselbe nicht durch äußere Kräfte abgeändert wird. Ich habe nun schon vor vielen Jahren bemerkt, dass in diesem Trägheitsgesetz eine große Unbestimmtheit liegt, indem nicht gesagt gegen welche Körper die Richtung*

*und Geschwindigkeit des bewegten Körpers gemeint ist. Auf diese Unbestimmtheit, so wie auf eine Reihe von Paradoxen, die sich daraus ziehen lassen, und die Auflösung der Schwierigkeiten, habe ich [...] im Sommer 1868 aufmerksam gemacht. Derselbe Gegenstand wurde regelmäßig in den folgenden Jahren von mir besprochen. Meine Untersuchung gelangte [...] jedoch nicht zum Druck.“*

Ernst Mach [100]

Danach lässt Mach ein Beispiel folgen, das den Charakter der erwähnten Paradoxien deutlich zum Ausdruck bringt:

*„Es ist offenbar einerlei, ob wir uns die Erde um die Achse gedreht denken oder ob wir uns die Erde ruhend um die Himmelskörper um dieselbe gedreht vorstellen. Geometrisch ist dies genau derselbe Fall einer relativen Drehung der Erde und der Himmelskörper gegeneinander. Nur ist die erstere Vorstellung astronomisch bequemer und einfacher.“*

Ernst Mach [100]

Jetzt betrachtet Mach die Situation aus der zweiten, unbequemerer Perspektive:

*„Denken wir uns aber die Erde ruhend und die übrigen Himmelskörper um sie gedreht, so gibt es keine Abplattung der Erde, keinen Foucault'schen Versuch u. s. w. Wenigstens nach unserer gewöhnlichen Auffassung des Trägheitsgesetzes ist es so. Nun kann man die Schwierigkeit in zweierlei Weise auflösen. Entweder alle Bewegung ist eine absolute, oder unser Trägheitsgesetz ist fehlerhaft ausgedrückt. [...] Das Trägheitsgesetz müsste nun so gefasst werden, dass bei der zweiten Annahme genau dasselbe herauskommt, wie bei der ersten. Es wird hierdurch ersichtlich, dass in dem Ausdrücke auf die Massen des Weltraumes Rücksicht genommen werden muss.“*

Ernst Mach [100]

Machs Beispiel bringt das Dilemma präzise auf den Punkt: Damit ein Erdbeobachter die Abplattung des Planeten oder das Verhalten eines Foucault'schen Pendels korrekt interpretieren kann, muss er seine eigene Rotation feststellen. Dass die Erde rotiert, kann aber nur bedeuten, dass sie entweder gegen den absoluten Raum rotiert oder gegen ein anderes Bezugssystem wie den Fixsternhimmel. Verneinen wir die Existenz eines absoluten Raums, so scheidet die erste Möglichkeit aus, und uns bleibt nichts anderes übrig, als die zweite zu akzeptieren. Dann aber, und dies ist der entscheidende Punkt, müssen die fernen Massen der Gestirne die Ursache der Fliehkräfte sein. Mit dieser schlichten, aber durchaus überzeugenden Argumentation war es Mach gelungen, einen Bezug zwischen zwei völlig unterschiedlichen physikalischen Begriffen herzustellen: der Gravitation und der Trägheit.

Die Schlussfolgerung, die wir soeben gezogen haben, ist ein Teil dessen, was in der Literatur als das *Mach'sche Prinzip* bezeichnet wird. Wir wollen nicht verschweigen, dass dieser Begriff nur fließend abgegrenzt ist und verschiedene Autoren ganz unterschiedliche Aspekte der Mach'schen Ideenleere darunter vereinen. Auch in den Originalquellen werden wir nicht fündig; es gibt darin keine einzige Passage, in denen Mach seine vielschichtigen Gedanken in einem klar umrissenen Prinzip konsolidiert. Doch was auch immer das Mach'sche Prinzip im konkreten Fall bedeuten mag: Allen gängigen Definitionen ist gemein, dass niemals von einer absoluten Bewegung eines Körpers, sondern immer nur von einer Bewegung in Bezug zu den anderen Körpern des Universums gesprochen werden darf, und genau in diesem Sinne wollen wir das Mach'sche Prinzip in diesem Buch verstanden wissen.

Das eben besprochene Gedankenexperiment legt nahe, dass die Begriffe der Physik so zu vereinheitlichen sind, dass zwischen Trägheits- und Gravitationskräften nicht mehr unterschieden wird. Mach war bis zu seinem Tod ein Verfechter dieser Idee, doch die Frage, wie dies genau zu geschehen hatte, konnte er selbst nicht beantworten.

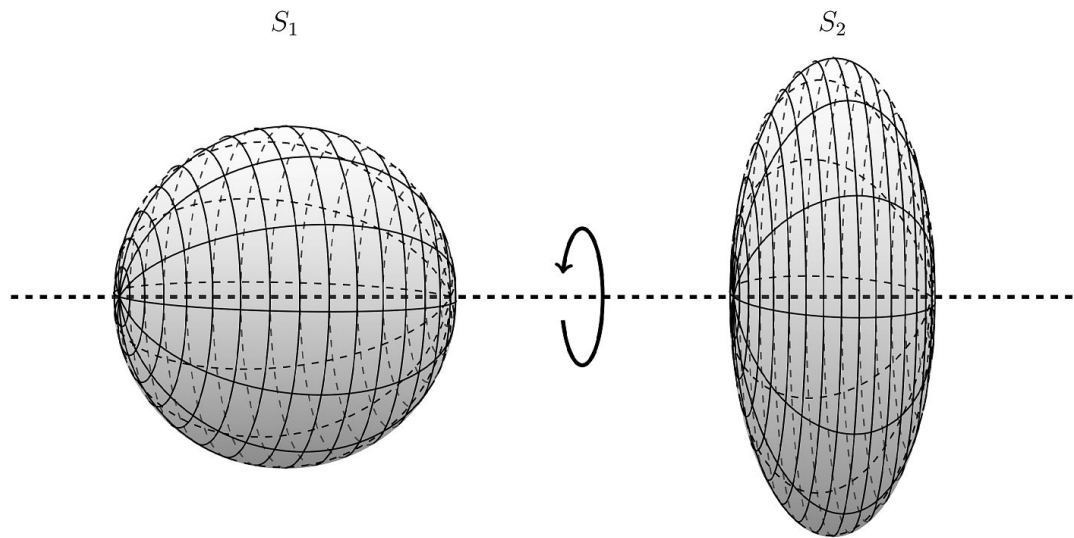
*„Welchen Anteil hat nun jede Masse an der Bestimmung der Richtung und Geschwindigkeit im Trägheitsgesetz? Darauf lässt sich nach unseren Erfahrungen keine bestimmte Antwort geben.“*

Ernst Mach [100]

## Einsteins Interpretation

In Machs Todesjahr fand Einstein die Antwort. Der Verstorbene hätte an der Arbeit, die 1916 in den Annalen der Physik erschien, sicherlich die helle Freude gehabt, denn bereits im zweiten Paragraphen, dem Paragraphen *„über die Gründe, welche eine Erweiterung des Relativitätsprinzips nahelegen“*, führt Einstein ein Gedankenexperiment im Mach'schen Sinne aus.

Auf den ersten Blick wirkt das Gedankenexperiment simpel. Es findet in einem Universum statt, in dem lediglich zwei Körper  $S_1$  und  $S_2$  existieren, die so weit voneinander entfernt sind, dass die gravitative Anziehung zwischen ihnen vernachlässigt werden darf. Wir nehmen an, dass es sich bei den Körpern um zwei gleich geartete flüssige Kugeln handelt, die durch die Gravitationskraft zusammengehalten werden. Ferner nehmen wir an, dass  $S_1$  und  $S_2$  relativ zueinander mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit um die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte rotieren. Als Nächstes platzieren wir auf beiden Körpern im Geiste einen Beobachter. Fragen wir nach, wie die Szenerie aus deren Sicht empfunden wird, so ist die Antwort beide Male die gleiche: Jeder empfindet sich selbst als ruhend und den anderen als rotierend. Jetzt nehmen wir an, dass die beiden Beobachter die Körper genau vermessen und dabei



**Abbildung 9.2:** Zu Einsteins einleitendem Gedankenexperiment in [45]

beobachten, dass  $S_1$  die Gestalt einer perfekten Kugel hat und  $S_2$  zu einem Rotationsellipsoid verformt ist (Abbildung 9.2). Welchen Schluss werden die beiden Beobachter daraus ziehen?

Aus der Sicht der Newton'schen Physik ist die Sachlage klar: Die Verformung von  $S_2$  muss durch Fliehkräfte verursacht worden sein. Fliehkräfte sind die Folge einer Rotation, so dass wir aus dem Beobachteten schließen können, dass  $S_1$  ruht und  $S_2$  rotiert. Doch Einstein gibt zu bedenken:

*„Eine Antwort auf diese Frage kann nur dann als erkenntnistheoretisch befriedigend anerkannt werden, wenn die als Grund angegebene Sache eine beobachtbare Erfahrungstatsache ist; denn das Kausalitätsgesetz hat nur dann den Sinn einer Aussage über die Erfahrungswelt, wenn als Ursache und Wirkung letzten Endes nur beobachtbare Tatsachen auftreten.“*

Albert Einstein [45]

Einsteins Worte offenbaren das Dilemma: Um die Verformung von  $S_2$  zu erklären, haben wir uns unbewusst auf genau jenen Begriff gestützt, den die Relativitätstheorie vollständig zu eliminieren versucht: den absoluten Raum. Dies lässt sich leicht begründen. Zunächst ist klar, dass für die Abplattung von  $S_2$  nicht  $S_1$  verantwortlich sein kann, da beide Körper völlig gleichbeschaffen und damit gegeneinander austauschbar sind. Die Aussage, dass  $S_1$  ruhe und  $S_2$  rotiere, kann hier also nur bedeuten, dass  $S_1$  im absoluten Raum ruht und  $S_2$  gegenüber dem absoluten Raum rotiert. Mit anderen Worten: Wir haben den absoluten Raum künstlich eingeführt als eine „fingierte Ursache“, wie ihn Einstein in [45] bezeichnet.

In [15] setzt sich der Physiker Max Born mit Einsteins Beispiel des deformierten Körpers ebenfalls auseinander. Er findet dafür die folgenden, treffenden Worte:

*„Der Raum als Ursache befriedigt aber das Kausalitätsbedürfnis nicht. Denn wir kennen keine andere Äußerung seiner Existenz als die Fliehkräfte. Man kann also die Hypothese des absoluten Raumes durch nichts anderes belegen als durch die Tatsachen, zu deren Erklärung sie eingeführt ist. Eine gesunde Erkenntniskritik lehnt solche ad hoc gemachten Hypothesen ab; sie sind zu billig und zerbrechen alle Schranken, die gewissenhafte Forschung zwischen ihren Ergebnissen und den Hirngespinnsten der Phantasie aufzurichten sucht.“*

Max Born [15]

Etwas später wird Born noch deutlicher:

*„Der absolute Raum aber hat nahezu spiritistischen Charakter. Fragt man: ‚was ist die Ursache der Fliehkräfte?‘, so lautet die Antwort: ‚der absolute Raum‘. Fragt man aber: ‚was ist der absolute Raum und worin äußert er sich sonst?‘, so weiß niemand eine andere Antwort als die: ‚der absolute Raum ist die Ursache der Fliehkräfte, sonst hat er keine Eigenschaften‘. Diese Gegenüberstellung zeigt zur Genüge, dass der Raum als Ursache physikalischer Vorgänge aus dem Weltbilde beseitigt werden muss.“*

Max Born [15]

Wenn wir uns abermals zwingen, von der Vorstellung eines absoluten Raums Abstand zu nehmen, wie ließe sich dann erklären, dass einer der Körper kugelförmig und der andere zu einem Ellipsoid verformt ist? Die Antwort ist einfach und dennoch schwer zu verdauen: Es ließe sich überhaupt nicht erklären und man muss, in Borns Worten, „verlangen, dass eine befriedigende Mechanik diese Annahme ausschließt“. Aber ist dies nicht ein logischer Widerspruch? Muss sich nicht mindestens einer von zwei relativ zueinander rotierenden Körpern zu einem Ellipsoid verformen? Wenn wir hier einen logischen Widerspruch zu sehen glauben, tappen wir in die Falle, die uns die Alltagserfahrung stellt. Alle Versuche, die wir mit rotierenden Körpern anstellen können, um die aufgeworfene Frage empirisch zu klären, unterscheiden sich von dem geschilderten Szenario in einem wesentlichen Punkt: Das Universum ist nicht leer und die ruhende von der rotierenden Bewegung stets unterscheidbar. Dies wiederum bedeutet, dass die fernen Massen der Gestirne die Ursache der Fliehkräfte sein müssen, und genau dies war die Idee, die der Philosoph und Physiker Ernst Mach lange vor Einsteins Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie mit Vehemenz vertrat.

Einstein beantwortet diese Frage ebenfalls in diesem Sinne:

*„Eine befriedigende Antwort auf die oben aufgeworfene Frage kann nur so lauten: Das aus  $S_1$  und  $S_2$  bestehende physikalische System zeigt für sich allein keine denkbare*

*Ursache, auf welche das verschiedene Verhalten von  $S_1$  und  $S_2$  zurückgeführt werden könnte. Die Ursache muss also außerhalb dieses Systems liegen. Man gelangt zu der Auffassung, dass die allgemeinen Bewegungsgesetze, welche im speziellen die Gestalten von  $S_1$  und  $S_2$  bestimmen, derart sein müssen, dass das mechanische Verhalten von  $S_1$  und  $S_2$  ganz wesentlich durch ferne Massen mitbedingt werden muss, welche wir nicht zu dem betrachteten System gerechnet hatten. Diese fernen Massen [...] sind dann als Träger prinzipiell beobachtbarer Ursachen für das verschiedene Verhalten unserer betrachteten Körper anzusehen[.]“*

Albert Einstein [45]

## 9.2 Das starke Äquivalenzprinzip

Mit der Einsicht, dass die fernen Massen der Gestirne die Ursache der Fliehkräfte sein müssen, haben wir die Trägheit und die Gravitation in einen unmittelbaren Zusammenhang gerückt. Ein Blick auf Seite 72 macht klar, dass ein solcher Zusammenhang keinesfalls neu für uns ist. Wir haben dort das schwache Äquivalenzprinzip kennengelernt, das die Gleichheit von träger und schwerer Masse postuliert. Wir erinnern uns: Die träge Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Tendenz, sich gegen die Beschleunigung zu stemmen, die eine einwirkende Kraft hervorrufen möchte, und die schwere Masse bestimmt, wie sich ein Körper im Schwerfeld verhält, d. h., welche Gravitationskräfte er durch andere Körper erfährt und welche Gravitationskräfte er selbst erzeugt. Aus dem Blickwinkel der klassischen Physik muss die empirische Tatsache, dass zwei Körper mit der gleichen trägen Masse stets dieselbe Beschleunigung in einem Schwerfeld erfahren, wie ein erstaunlicher Zufall erscheinen; erklären lässt sie sich jedenfalls nicht.

Einstein sah in dem schwachen Äquivalenzprinzip alles andere als eine zufällige Laune der Natur. Als er sich in späteren Jahren an die Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie zurückerinnerte, äußerte er sich folgendermaßen über seine damaligen Gedanken:

*„Dieser Satz, der auch als der Satz von der Gleichheit der trägen und schweren Masse formuliert werden kann, leuchtete mir nun in seiner tiefen Bedeutung ein. Ich wunderte mich im höchsten Grade über sein Bestehen und vermutete, dass in ihm der Schlüssel für ein tieferes Verständnis der Trägheit und Gravitation liegen müsse. An seiner strengen Gültigkeit habe ich [...] nicht ernsthaft gezweifelt.“*

Albert Einstein [52]

Einstein war davon überzeugt, dass sich hinter den beiden Begriffen der Gravitation und der Beschleunigung ein gemeinsames, ununterscheidbares Naturphänomen ver-

barg. In seine Theorie integrierte er die Gleichheit von träger und schwerer Masse in Form des *starken Äquivalenzprinzips*, das wir zunächst so formulieren:

#### Starkes Äquivalenzprinzip

In einem räumlich begrenzten Bezugssystem sind Gravitationskräfte und Trägheitskräfte äquivalent.

Wir wollen an einer bekannten Analogie präzisieren, was damit gemeint ist. Hierzu stellen wir uns einen Wissenschaftler vor, der in einer abgeschlossenen Kammer, die in etwa so groß ist wie die Fahrgastzelle eines Fahrstuhls, an den Fallgesetzen forscht. Wie es in Abbildung 9.3 angedeutet ist, lässt er aus verschiedenen Höhen Gegenstände fallen und vergleicht deren Bewegungslinien. Der Wissenschaftler, der sich in seiner Kammer auf der Erde wähnt, erklärt das Fallen der Gegenstände mit dem Schwerfeld, in dem er sich befindet. Aus seiner Sicht ist es die Gravitationskraft, die den Körper gleichmäßig in Richtung des Bodens beschleunigt. Nachdem er den Versuch wieder und wieder mit verschiedenen Körpern durchgeführt hat, kommt er zu dem gleichen Schluss, zu dem einst Galilei kam: Alle Körper fallen gleich schnell nach unten, unabhängig von ihrer äußeren Form oder ihrer chemischen Zusammensetzung.

Und wie stellt sich die Situation dar, wenn das Labor des Wissenschaftlers gar nicht auf der Erde steht, sondern gleichmäßig beschleunigt durch das Weltall rast, wie es in Abbildung 9.4 gezeigt ist? Innerhalb seines Labors kann der Wissenschaftler den Unterschied nicht bemerken. Durch die gleichmäßige Beschleunigung drückt der Boden jetzt permanent gegen seine Füße und vermittelt ihm dadurch ein Gefühl der Schwere. Öffnet der Wissenschaftler seine Hand, so wird die Beschleunigung der Kammer nicht mehr auf den Gegenstand übertragen. Da die Kammer aber weiterhin von außen beschleunigt wird, kollidiert die immer schneller werdende Bodenplatte kurze Zeit später mit dem Gegenstand, der seine Geschwindigkeit seit dem Loslassen nicht mehr verändert hat. Für unseren Forscher sind beide Szenarien völlig äquivalent. Innerhalb der Kammer kann er mit keinem Experiment entscheiden, ob ein Gravitationsfeld die losgelassenen Gegenstände nach unten beschleunigt oder eine äußere Kraft die Kammer nach oben. Genau dies ist die Aussage des starken Äquivalenzprinzips: Gravitationskräfte und Trägheitskräfte sind in einem räumlich begrenzten Bezugssystem äquivalent.

Dass das schwache Äquivalenzprinzip, d. h. die Äquivalenz zwischen schwerer und träger Masse, aus dem starken Äquivalenzprinzip folgt, wird mit einem Blick auf die Abbildungen 9.5 und 9.6 deutlich. Wir sehen dort, dass unser Wissenschaftler mittlerweile dazu übergegangen ist, einen Körper mithilfe einer Feder an der Kammerdecke zu befestigen. Wenig überraschend stellt er dabei fest, dass der Körper die Feder spannt. Aber was ist die Ursache für das beobachtete Phänomen? Befindet sich unser Kasten in einem Schwerfeld, so zieht die Gravitationskraft den Körper nach



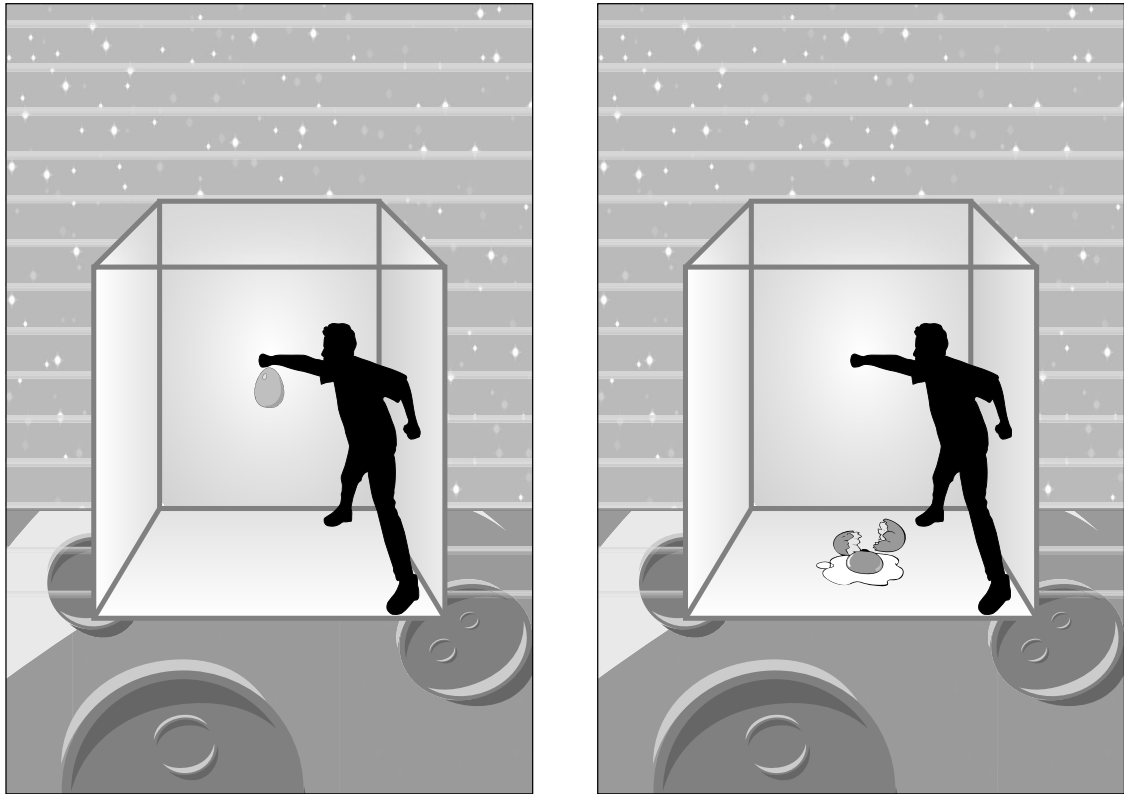


Abbildung 9.3: Fallexperiment im Gravitationsfeld

unten und sorgt auf diese Weise für die Spannung. Die Kraft, die auf die Feder wirkt, ist dann proportional zur schweren Masse des Körpers. Wird unser Kasten dagegen gleichmäßig beschleunigt, so ist die Argumentation eine ganz andere. In diesem Fall sorgt die Trägheit dafür, dass sich der Körper der Beschleunigung widersetzt, die von der wegstrebenden Decke auf die Feder übertragen wird. Kurzum: Die träge Masse spannt die Feder. Nach dem starken Äquivalenzprinzip sind die beiden Fälle für den Wissenschaftler ununterscheidbar, d. h., die Feder muss sich in beiden Fällen in exakt derselben Weise dehnen. Das bedeutet, dass die schwere und die träge Masse eines Körpers gleich sein müssen, und genau dies ist die Aussage des schwachen Äquivalenzprinzips.

An dieser Stelle drängt sich eine Frage auf: Was passiert, wenn die äußere Kraft verschwindet? Von außen betrachtet würde die vormals beschleunigte Kammer ihre momentane Geschwindigkeit beibehalten und sich nun gleichförmig durch das Weltall bewegen. Sie würde aufhören, mit ihrem Boden gegen die Füße des Wissenschaftlers zu drücken und befände sich ab jetzt, physikalisch gesehen, im freien Fall. Der Wissenschaftler in der Kammer wird die Situation anders empfinden: Er würde konstatieren, dass die Schwerkraft urplötzlich abgeschaltet wurde. Diese Sichtweise eröffnet uns die Möglichkeit, das starke Äquivalenzprinzip auch folgendermaßen zu charakterisieren: