



IN DIESEM KAPITEL

Ruhe und Bewegung

Bezugssysteme

Das klassische Relativitätsprinzip

Kapitel 1

Das Klassische Relativitätsprinzip

lassen Sie mich raten. Wahrscheinlich sitzen Sie gerade gemütlich in einem Sessel oder auf der Couch in Ihrem Wohnzimmer und haben die Beine übereinander geschlagen. Währenddessen, und ohne dass es Ihnen in besonderem Maß bewusst wäre, wännen Sie sich in *Ruhe*. Ich meine nicht jene Ruhe, die sich einstellt, wenn die Kinder im Bett und die Schwiegereltern aus dem Haus sind. Ich meine auch nicht die mentale Ruhe, die den ausgeglichenen Menschen vom Hektiker unterscheidet. Wenn Sie in diesem Buch davon lesen, dass ein Objekt (zum Beispiel Sie selbst oder eine Dampflok) *in Ruhe* sei, meine ich damit immer, dass es unbewegt an seinem Ort verharret.



Ein Objekt ist **in Ruhe**, wenn sich seine Ortskoordinaten nicht verändern, das heißt, wenn es unbewegt an seinem Ort verweilt.

Gut. Sie sind also in Ruhe. Gleichzeitig wissen Sie natürlich, dass die Erde zusammen mit Ihnen in atemberaubender Geschwindigkeit durch das All rast, jede Sekunde 30 Kilometer weit (das sind 108.000 km/h!) auf ihrer bekannten Bahn um die Sonne. Die Sonne, mitsamt der Erde, der anderen Planeten, mit allen Kometen und Asteroiden wandert in jeder Sekunde sage und schreibe 220 Kilometer um das Zentrum der Milchstraße. Sogar die Milchstraße zieht in gehörigem Tempo (mit etwa 600 Kilometern pro Sekunde) durch die sogenannte Lokale Gruppe (ein Galaxienverbund, zu dem außer unserer Milchstraße die Andromeda-Galaxie und einige Dutzend kleinere Sternsysteme gehören). Spätestens jetzt wird es unübersichtlich, denn die Lokale Gruppe ihrerseits ... – aber genug, Sie wissen, worauf ich hinaus will.

Was genau meinen wir also, wenn wir sagen, wir befinden uns *in Ruhe*?

Ein anderes Beispiel: Möglicherweise werden in einigen Jahrzehnten Menschen über den Mars spazieren. Sie werden dort leben und arbeiten, und gelegentlich wird es vorkommen, dass



28 TEIL I Der Weg zur modernen Physik

einer von ihnen sich auf einem bequemen Sessel ausruht. Vielleicht machen Sie in einem solchen Moment gerade dasselbe hier auf der Erde. Jeder von Ihnen, Sie und der Marsbewohner, wird dann mit gutem Recht behaupten: »Ich befinde mich in Ruhe.« Je nach Konstellation bewegen sich Erde und Mars aber mit mehreren Kilometern pro Sekunde aufeinander zu oder voneinander fort. Offenbar können Sie und der Marsbesucher also nicht beide gleichzeitig in Ruhe sein. Wer von Ihnen ruht jetzt also und wer ist in Bewegung?

Was ist Bewegung ?

Bestimmt kennen Sie das folgende Phänomen: Sie betreten einen Zug, nehmen Platz und warten auf die Abfahrt. Direkt vor Ihrem Fenster verstellt ein Zug auf dem Nachbargleis die Sicht. Fünf Minuten nach der planmäßigen Abfahrtszeit Ihres Zugs kommt endlich Bewegung in die Sache. Das merken Sie daran, dass der Zug auf dem Nachbargleis vor Ihrem Gesichtsfeld vorbeizieht. Manchmal stellen Sie aber überrascht fest: In Wahrheit ist es nicht *Ihr* Zug, der sich in Bewegung setzt, sondern derjenige auf dem Nachbargleis und Ihre Verspätung wächst unerbittlich weiter.

Der irrtümliche Eindruck, dass Ihre Reise nun endlich beginnen würde, ist einer simplen Erfahrung geschuldet:



Bewegung erkennen und definieren wir dadurch, dass wir unsere Position gegenüber einem festen Bezugsrahmen verändern.

Dieser Bezugsrahmen ist für gewöhnlich etwas fest mit der Erde Verbundenes. Das könnten zum Beispiel die Gebäude sein, die Sie hinter sich lassen, während Sie mit dem Auto durch eine Stadt fahren, oder der Parkettboden Ihrer Wohnung, der unbewegt daliegt, während Sie von der Couch zum Kühlschrank schlendern. Eine besonders wichtige Form der Bewegung ist die *gleichförmige*:



Unter **gleichförmiger Bewegung** versteht man in der Mechanik eine Bewegung mit gleichbleibender Geschwindigkeit in gleichbleibender Richtung. Jede andere Art der Bewegung nennt man **beschleunigt**.

Beschleunigte Bewegung bedeutet also nicht zwangsläufig, dass irgendetwas schneller wird. Vielmehr fällt *jede Veränderung* des Bewegungszustands in der Physik unter den Begriff der Beschleunigung, also auch eine Verlangsamung oder lediglich eine Veränderung der Richtung. Ein Spezialfall ist die *gleichmäßige Beschleunigung*. Damit ist gemeint, dass die Änderungsrate der Geschwindigkeit über die Zeit konstant bleibt. Beispiele sind der freie Fall ohne Luftwiderstand oder die Bewegung mit konstantem Tempo auf einem Kreis.

Dass die Sache mit Ruhe und Bewegung nicht ganz so simpel ist, wie man gemeinhin glaubt, ist den Menschen schon lange vor Einstein aufgefallen – allen voran dem berühmten italienischen Naturforscher Galileo Galilei (1564–1642). Im Jahr 1630 erschien sein Hauptwerk



KAPITEL 1 Das Klassische Relativitätsprinzip 29

mit dem Titel »Dialog über die beiden hauptsächlichen Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische«. Galilei beschreibt darin, wie ein Bootsfahrer unter Deck die gleichförmige Bewegung seines Schiffs als *Ruhe* erlebt. Egal wie rasch der Kahn über das Gewässer treibt, nichts in seinem Innern deutet auf eine Bewegung hin: weder das Empfinden des Reisenden, noch die Vorgänge, die er in seiner Kajüte beobachten kann.

Nun könnte man sich eine Reihe von Einwänden ausdenken. Zwar mag der Schiffsreisende seine Bewegung nicht visuell anhand der vorbeidriftenden Umgebung bemerken. Aber es sollte sich doch irgendeine Methode finden lassen (und sei sie noch so vertrackt), um am Ende sagen zu können: *Ich bin in Ruhe* oder *Ich bin in Bewegung!*

Galilei stattete den Reisenden mit einer ganzen Reihe von Vorrichtungen und Ideen aus, mit deren Hilfe sich der Bewegungszustand des Schiffs vielleicht erkennen ließe. Mit einem an der Decke aufgehängten Eimer zum Beispiel, von dem Wasser in einen senkrecht darunter stehenden Becher tropft. Sollte das in einem bewegten Schiff funktionieren? Immerhin bewegt sich das Schiff jedes Mal ein paar Zentimeter vorwärts, während sich der nächste Wassertropfen auf den Weg senkrecht nach unten zum Becher macht. Würde man also nicht erwarten, dass die Tropfen stets ein Stück weit hinter dem Becher landen? Nichts dergleichen kann der Schiffsreisende beobachten. Das Experiment funktioniert im ruhenden wie im bewegten Schiff gleichermaßen, die Wassertropfen finden in beiden Fällen ihren Weg in den Becher. Als nächstes sollte der Reisende versuchen, mit aller Kraft aus dem Stand einen Hüpfen je in Fahrtrichtung und gegen dieselbe zu versuchen. Man könnte spontan erwarten, dass der Sprung nach hinten weiter ausfällt, da der Schiffsboden dem Springenden während des Sprungs ja ein Stück weit entgegenkommt. Tatsächlich stellt sich aber heraus, dass die Sprünge in keinem der Fälle kürzer oder weiter geraten. Auch an einem schwingenden Pendel oder einem Kreisel würde die Bewegung zu keinerlei Auffälligkeiten führen. Und selbst beim Billard, das besonders empfindlich auf äußere Störungen reagiert, würden sich die Kugeln auf dem fahrenden Schiff nicht anders anstellen als sonst. Alle Experimente dieser Art enden mit einem *Nullergebnis*. Egal mit welcher Methode Sie versuchen, einen Effekt zu finden, der die Bewegung des Schiffs verrät: Es wird Ihnen nicht gelingen! Galilei zog aus solchen Erfahrungen einen Schluss, der bis heute sehr grundlegend für das Verständnis der Mechanik ist.



Es gibt keine Experimente, mit deren Hilfe Sie feststellen könnten, ob Sie sich in Ruhe oder aber in gleichförmiger Bewegung befinden.

So lautet dem Sinn nach die erste Fassung des *klassischen* (oder auch *Galilei'schen*) *Relativitätsprinzips*. Etwas formaler liest sich das so:



Klassisches Relativitätsprinzip: Mechanische Vorgänge verlaufen in ruhenden und gleichförmig bewegten Systemen in gleicher Weise.

Wichtig ist hier der Begriff der *gleichförmigen* Bewegung! Denn für eine beschleunigte Bewegung gilt dieses Prinzip nicht so ohne Weiteres, wie Sie bald sehen werden.

30 TEIL I Der Weg zur modernen Physik

Vom Koordinatensystem ...

Wenn Ihnen der Begriff des Koordinatensystems einigermaßen vertraut ist, werden in diesem Abschnitt wenig Neues finden. Für alle anderen sei gesagt, dass Koordinatensysteme uns von einer Menge Ballast befreien: Anstatt über statische Ufer, Landschaften und Wohnzimmerausstattungen zu fabulieren, wollen wir in Zukunft einfach von Koordinatensystemen und Bezugssystemen sprechen.

Nehmen wir als Beispiel einen Zug, der gerade in einen Bahnhof einfährt, wie in Abbildung 1.1 gezeigt. Für einen Beobachter, der neben den Gleisen wartet, ist der Bahnsteig mit allem, was dazu gehört (der Uhr, dem Fahrkartenautomaten, dem Gebäude, dem Gleis mit den Holzschwellen und so weiter) ein fester Bezugsrahmen, in dem er Ruhe und Bewegung unterscheiden kann.

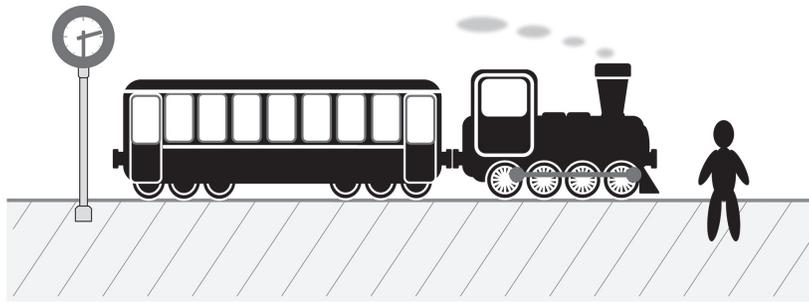


Abbildung 1.1: Das Bezugssystem »Bahnsteig« mit einem Beobachter

Wenn es der Beobachter genau wissen will, könnte er zum Beispiel feststellen, dass das vordere Ende der Lok exakt um halb drei den Pfeiler der Uhr passiert hat. Wir können die Beschreibung der Situation deutlich abspecken, wenn wir nun den Bahnsteig und seine Ausstattung aus Ihrer Vorstellung verschwinden lassen und durch ein rechtwinkliges (so genanntes kartesisches) Koordinatensystem ersetzen (Abbildung 1.2).

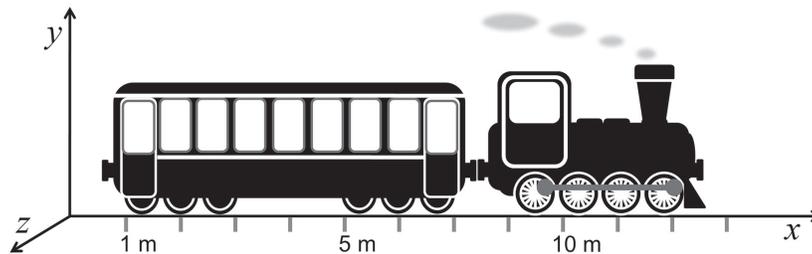


Abbildung 1.2: Ein Koordinatensystem ersetzt den Bahnsteig

Wo eben noch die Bahnhofsuhr stand, sehen Sie jetzt den *Ursprung* des Koordinatensystems, aus dem die drei senkrecht aufeinander stehenden räumlichen Achsen hervorgehen. Natürlich ist es reine Willkür, den Ursprung des Koordinatensystems an den Ort der Uhr zu legen. Er könnte ebenso gut in der Mitte des Bilds liegen oder am Standort des Beobachters.

KAPITEL 1 Das Klassische Relativitätsprinzip 31

Was wir ebenfalls brauchen, ist ein *Maßstab*, mit dessen Hilfe sich die Länge und die Position des Zugs durch eine Zahl ausdrücken lassen. Der übliche Längenmaßstab in der Physik ist natürlich der *Meter*.

Auch die Entscheidung, dass wir die Länge des Zugs entlang der x -Achse gelegt haben, ist willkürlich. Wenn wie im Fall unseres Zugs ohnehin nur *eine* Bewegungsrichtung in Frage kommt, können wir die y - und z -Achse auch getrost weglassen. In anderen Fällen, wenn wir die Position eines Objekts im dreidimensionalen Raum angeben möchten, bedienen wir uns aller drei Achsen des Koordinatensystems. In Abbildung 1.3 ist gezeigt, wie es geht: Der Punkt P ist von der yz -Ebene offensichtlich sieben Längeneinheiten entfernt. Seine x -Koordinate hat damit den Wert sieben. Die Entfernungen von den beiden anderen Ebenen (xz und xy) betragen drei beziehungsweise vier Längeneinheiten. Auf diese Weise ordnen wir dem Punkt P die Koordinaten $(x, y, z) = (7, 3, 4)$ zu, die die Position des Punkts im Koordinatensystem eindeutig beschreiben.

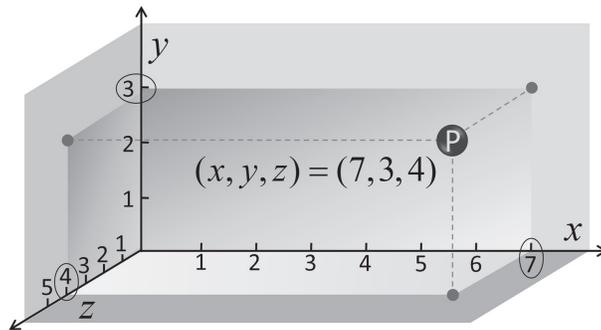


Abbildung 1.3: Ein Punkt P im Koordinatensystem

Der Punkt könnte die Sache aber noch komplizierter machen: Er könnte sich *bewegen*. Um auch dies zu berücksichtigen, ist es nötig, noch eine weitere »Dimension« einzuführen, nämlich die Zeit t .



Um die Bewegung des Punkts P zu beschreiben, benötigen wir ein dreidimensionales Koordinatensystem und eine Uhr. Zu jedem Zeitpunkt t sind dem Punkt dann bestimmte räumliche Koordinaten $(x(t), y(t), z(t))$ zugeordnet. Die Gesamtheit dieser Daten beschreibt die Bewegung des Punkts P vollständig.

Wenn der Punkt eine verhältnismäßig einfache Bewegung ausführt (zum Beispiel eine gleichförmige oder eine gleichmäßig beschleunigte), ist es leicht, die Koordinaten zu jedem Zeitpunkt t anzugeben. Bei komplizierten Bewegungen (etwa der Bewegung eines Luftmoleküls in der Atmosphäre) ist das ganz und gar unmöglich, geschweige denn durch Berechnung vorherzusagen.

Die Bewegung eines Objekts durch den physikalischen Raum lässt sich also im Prinzip mithilfe eines Koordinatensystems mit drei Achsen und der Angabe einer Zeit beschreiben. Dass dieses Koordinatensystem gerade drei Achsen hat, liegt natürlich daran, dass der physikalische Raum um uns herum *dreidimensional* ist. Denn es gilt ja ganz allgemein: Die Zahl der



32 TEIL I Der Weg zur modernen Physik

Koordinatenachsen, die es braucht, um einen Raum »aufzuspannen«, entspricht gerade der Dimension dieses Raums. Würde sich der Punkt P ausschließlich in einer *Ebene* bewegen, also in einem zweidimensionalen Raum, würden zu seiner Beschreibung zwei Koordinatenachsen ausreichen.

In der Physik hat es sich bewährt, die Zeit t als vierte Dimension anzusehen. Das wird spätestens dann essenziell, wenn in der Relativitätstheorie Raum und Zeit jene enge Verbindung eingehen, die man als vierdimensionale *Raumzeit* bezeichnet. Aber dazu später mehr.

... zum Bezugssystem

Gehen wir in Gedanken noch mal zurück auf den Bahnsteig, den wir inzwischen durch ein ruhendes Koordinatensystem ersetzt haben. Dieses Koordinatensystem stellt einen perfekten Bezugsrahmen dar, in dem sich zum Beispiel die Bewegungen der Züge eindeutig beschreiben lassen. Eine solche, mit einer Uhr ausgestattete räumliche Referenz bezeichnet man in der Mechanik als *Bezugssystem*. Wir sind damit bei einem Begriff gelandet, der für die Klassische Mechanik und ebenso für die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie von absolut grundlegender Bedeutung sein wird. Also bitte merken: Bezugssystem! Bezugssystem! Bezugssystem!



Ein **Bezugssystem** ist ein physikalischer Referenzrahmen, in Bezug auf welchen sich Positionen und Bewegungen beschreiben lassen.

Wann immer wir also im Weiteren eine räumliche Position, eine Geschwindigkeit, einen Zeitpunkt oder einen Zeitabschnitt charakterisieren möchten, müssen wir dazu sagen, auf welches Bezugssystem wir uns dabei beziehen (sofern das nicht ohnehin aus dem Kontext hervorgeht). Wenn Sie zum Beispiel die Geschwindigkeit einer vorbeifliegenden Taube messen wollen, werden Sie offensichtlich unterschiedliche Werte erhalten, je nachdem, ob Sie die Messung vom Bahnsteig oder aus dem fahrenden Zug heraus vornehmen. Für denjenigen, dem Sie das Messergebnis mitteilen möchten, ist es natürlich ganz entscheidend zu wissen, in welchem Bezugssystem Sie die Messung durchgeführt haben.

Alles nur Gedankenspiele!

Wenn Sie sich an dieser Stelle darüber wundern, weshalb jemand die Geschwindigkeit einer Taube aus einem fahrenden Zug heraus messen und den gemessenen Wert auch noch jemandem mitteilen wollte – nun, dann haben Sie ein gutes Indiz dafür, dass Sie noch alle Latten im Zaun haben. Solche bizarren Dinge passieren in der Regel nur in sogenannten *Gedankenexperimenten*. Sie werden noch sehen, dass Gedankenexperimente in der Relativitätstheorie eine enorm wichtige Rolle spielen. Physiker führen aus unterschiedlichen Gründen Gedankenexperimente durch. Entweder

- ✓ ist das Experiment in der Realität nicht durchführbar, lässt sich aber durch reines Nachdenken durchspielen und analysieren, oder

KAPITEL 1 Das Klassische Relativitätsprinzip 33

- ✓ das Experiment dient der reinen Veranschaulichung eines Sachverhalts, zum Beispiel der Tatsache, dass die gemessene Geschwindigkeit eines Objekts vom gewählten Bezugssystem abhängt.

Der Begriff des Gedankenexperiments ist in der Physik so sehr verankert, dass er sogar Einzug in den englischen Sprachgebrauch gefunden hat. Wenn Sie schon mal ein englisches Buch über Relativitätstheorie gelesen haben, sind Sie bestimmt einem Satz begegnet wie *As Einstein demonstrated in his famous gedankenexperiment, ...*

Während Sie nun in Ihrem Bezugssystem »Bahnhof« zusehen, wie der Zug einfährt, sitzt im Zug vielleicht jemand, auf den Sie warten. Ihr Freund mag dort seit mehreren Stunden sitzen und sich während seiner Reise wenig um das Bezugssystem »Bahnhof« geschert haben. Für ihn gilt ein anderes Bezugssystem, nämlich sein Zugabteil mit allem, was darin festgeschraubt ist: die Sitze, die Tische, auch die Fenster und die Karosserie des Waggons. Er sieht dieses System mit gleichem Recht als »sein« Bezugssystem an, wie Sie es mit dem Bahnsteig tun. Sie sehen also:



Bezugssysteme müssen nicht unbedingt ruhen! Es gibt auch bewegte Bezugssysteme.

Natürlich können wir auch das Bezugssystem »Zug«, und durch ein schlichtes Koordinatensystem ersetzen. Zur Unterscheidung vom Bahnhof würden wir die Achsen statt mit (x, y, z) nun mit (x', y', z') bezeichnen. Abbildung 1.4 zeigt die Verhältnisse in den beiden Bezugssystemen.

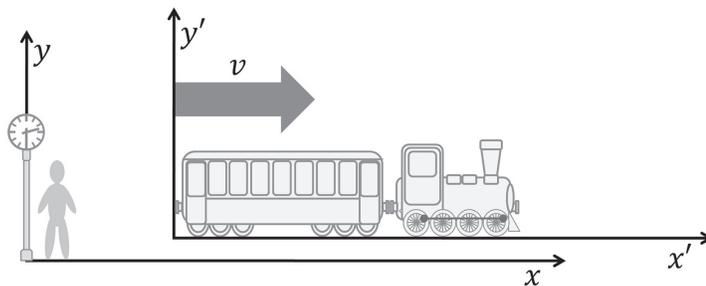


Abbildung 1.4: Bahnsteig und Zug: jeder kriegt sein eigenes Bezugssystem

In der Abbildung sehen Sie ein prima Beispiel dafür, wie Sie eine konkrete Situation abstrahieren, vereinfachen und idealisieren können. In der realen Welt stehen Sie auf einem Bahnsteig und beobachten einen Zug, der soeben mit der Geschwindigkeit v in den Bahnhof einfährt. Physikalisch, wenn wir von Bezugssystemen sprechen, haben wir es hier einfach mit zwei Bezugssystemen zu tun: »Ihr« ruhendes System S mit den Koordinatenachsen



34 TEIL I Der Weg zur modernen Physik

(x, y, z) und ein relativ dazu mit der Geschwindigkeit v bewegtes System S' mit den Achsen (x', y', z') . Und der Vollständigkeit halber wollen wir auch noch festhalten: in beiden Systemen gilt die von der Bahnhofsuhr angezeigte Zeit t , also $t = t'$ (nach dem englischen *time*).

Übrigens können wir uns das Leben noch ein bisschen einfacher machen, indem wir einen weiteren Begriff einführen:



Das Bezugssystem, in welchem ein Körper in Ruhe ist, nennen wir das **Ruhesystem** dieses Körpers.

