Der Raum

2.1 Raum im Alltag

Längst haben wir uns daran gewöhnt, dass wir durch Raum und Zeit reisen: Landkarten und Navigationssysteme leiten uns bequem von Ort A zu Ort B, ein Vorgang, der nun einmal einige Zeit beansprucht. Den Raum überwinden wir dabei mühelos und finden uns an einem neuen „Lebensraum" wieder. Der Raum hat sich allerdings nur insofern verändert, dass er mit einem neuen „Innenleben" ausgestattet wurde; vom Wesen her ist es immer noch das, was durch eine Länge, eine Breite und eine Höhe ausgezeichnet ist. Zumindest nehmen wir das so wahr.

Raum und Zeit sind vier vom Charakter her unterschiedliche **Dimensionen**, man könnte auch sagen Freiheitsgrade oder **Koordinaten**. Denn ein Körper hat die Freiheit, sich an einem bestimmten Ort, charakterisiert durch eine Länge, eine Breite und eine Höhe, und zu einer bestimmten Zeit, z. B. einem Datum mit Uhrzeit, zu befinden. Legt man einvernehmlich Nullpunkte fest, so kann man Länge, Breite, Höhe und Zeit einfach durch vier Zahlen festlegen. Wir messen Längen und Zeit *relativ* zu einem Bezugsort bzw. einer Bezugszeit. Das ist ein wichtiger Sachverhalt.

Stellen Sie sich vor, Sie verabreden sich zu einem Termin. Durch welche Angaben legen Sie den Treffpunkt fest? Nun, üblicherweise gibt man eine Adresse an, also durch die Angabe eines Landes plus einer Stadt plus eines Straßennamens und einer Hausnummer sowie einer Etage. Hätte sich die Menschheit darauf verständigt, dass man Straßennamen nur einmal vergeben könnte, so wäre offensichtlich, dass sich hinter dem Straßennamen eigentlich eine Raumdimension verbirgt. Wir könnten festlegen, dass dies die „Breite“ sein soll. Sie müssen die Straße so lange entlanglaufen, bis Sie die richtige Hausnummer des Treffpunkts erreichen. Es wäre demnach sinnvoll zu vereinbaren, dass die Hausnummer die „Länge“ festlegen soll und als 2. Raumdimension verstanden werden kann. Schließlich müssen Sie in dem betreffenden Haus in das richtige Stockwerk gehen, damit Sie Ihren Termin erwischen – im Keller könnten Sie unter Umständen ewig auf Ihr Treffen warten. Es kommt also noch die 3. Raumdimension, die „Höhe“ dazu. Damit es wirklich zum Termin kommt, müssen Sie nicht nur räumlich (in allen drei Raumdimensionen) richtig sein, sondern auch pünktlich – es kommt also auch auf die Zeit an, zu der Sie sich am Treffpunkt einfinden. Das ist die vierte Angabe: die Zeit.

Als Nullpunkt haben wir in unserem christianisierten Kulturkreis die Geburt Jesu festgelegt und zählen die Zeit, die seither verstrichen ist. Wir geben dies als Datum an, d. h. Jahr, Monat und Tag, benötigen aber auch die richtige Uhrzeit am betreffenden Tag. Im Prinzip verbirgt sich dahinter eine Zeitangabe, die wir ebenso gut in Sekunden angeben könnten, die seit der Geburt Jesu vergangen sind. Dann wäre es nur eine einzige Zahl, die sich aber für den Alltagsgebrauch als zu unhandlich entpuppt hat. Insgesamt schließen wir daraus: *Vier Zahlen* legen Ihren Termin eindeutig fest. Dahinter verbirgt sich nichts anders als Raum und Zeit, die wir in Zahlen gefasst haben. In der Physik nennt man einen solchen Termin aus vier Zahlen auch ein *Ereignis*.

2.2 Raumkoordinaten und Raumskala

Ein Ereignis ist ein Punkt in Raum und Zeit, der mit vier Zahlen eindeutig charakterisiert werden kann. Um die Zahlen angeben zu können, müssen geeignete Nullpunkte festgelegt worden sein. Die vier Zahlen heißen auch *Koordinaten*.

Im Folgenden wollen wir unsere Betrachtung nur auf den Raum beschränken und nur die drei Raumkoordinaten Länge, Breite und Höhe betrachten. Es gibt viele verschiedene Koordinatensysteme, die sich im Wesentlichen dadurch unterscheiden, dass sie an die Symmetrie des betrachteten Raums angepasst sind. Ein Zimmer hat im Allgemeinen die dreidimensionale Form eines Quaders. Wir können willkürlich eine Ecke des Zimmers als Nullpunkt festlegen und von dort entlang der drei Kanten, die aus der Ecke hinauslaufen, drei Raumachsen benutzen, von denen eine die Länge, die zweite die Breite und die dritte die Höhe des Zimmers abmisst. Wir können einen beliebigen Punkt im Zimmer festlegen, indem wir angeben, wie weit man jeweils an den drei Raumachsen entlanggehen muss, bis wir den betreffenden Punkt erreichen (Abbildung 2.2.1).

Das oben beschriebene Zimmer mit den drei senkrecht aufeinanderstehenden Raumachsen bildet ein sogenanntes **kartesisches Koordinatensystem**. Dessen Verwendung bietet sich bei allen eckigen Gebilden und Räumen an.

Nun stellen Sie sich aber vor, Sie betreten einen halbkugelförmigen Raum, z. B. ein Planetarium.

Die Angabe eines Punkts in diesem Raum mithilfe der kartesischen Koordinaten ist zwar möglich, aber sehr unhandlich, weil sie nicht an die Symmetrie des Raums angepasst sind. Es bietet sich beim Planetarium an, ein neues, an die Symmetrie angepasstes Koordinatensystem zu verwenden: die **Kugelkoordinaten**. Hierbei gibt es einen nahe liegenden ausgezeichneten Punkt, nämlich denjenigen in der Mitte des Durchmessers des Planetariumbodens (Abbildung 2.2.2). Von hier aus gehen Halbgeraden in den Raum hinaus bis an die Planetariumdecke. Ein Punkt im Planetariumraum hat einen bestimmten, festen Abstand von dem Zentralpunkt. Aber das gilt auch für viele andere Punkte im Raum. Um eindeutig einen bestimmten Punkt angeben zu können, benötigt man noch zwei weitere Angaben, am besten zwei Winkel. Das lässt sich gut mit einem Globus vergleichen. Er wird durch die Äquatorebene in zwei Halbkugeln geschnitten. Die obere kann man direkt mit dem Planetariumraum vergleichen. Auf einem Globus gibt es zur Festlegung des Orts zwei

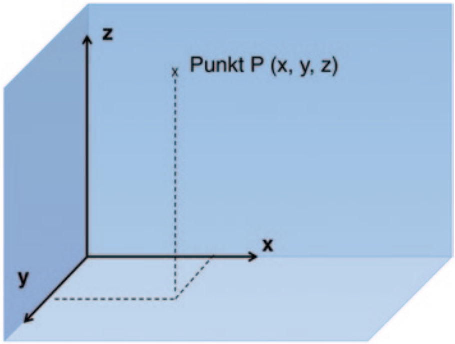

Abb. 2.2.1 Drei senkrecht aufeinanderstehende Raumachsen bilden ein „Zimmer“, einen dreidimensionalen Raum. Ein beliebiger Punkt P im Raum wird durch die Angabe von drei Zahlen (x, y, z) eindeutig festgelegt, von denen man jeweils eine an der betreffenden Achse ablesen kann. Die drei Zahlen, Mathematiker nennen es ein Tripel, sind in diesem Fall die kartesischen Koordinaten. © A. Müller.

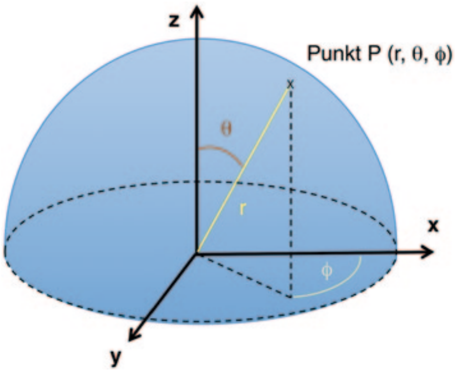

Abb. 2.2.2 Für einen halbkugelförmigen Raum, z. B. ein Planetarium, bietet sich ein anderes Koordinatensystem an, das an die Kugelform angepasst ist: Kugelkoordinaten. Ein beliebiger Punkt P im Raum wird hier eindeutig durch seinen Abstand vom Kugelzentrum, dem Radius r, sowie zwei Winkeln, dem Azimut ϕ und dem Poloidalwinkel θ, festgelegt. © A. Müller

Angaben, nämlich die geografische Länge und die geografische Breite. Im Prinzip sind es zwei Winkel. Man muss nur geeignet festlegen, wo man eine geografische Länge null und eine geografische Breite null hat. Es wurde so festgelegt, dass am Äquator die geografische Breite null ist und an den geografischen Polen 90°. Beim Nordpol beträgt sie +90° oder 90° nördliche Breite, und beim Südpol ist sie –90° oder 90° südliche Breite. Die geografische Länge wurde zu 0° festgelegt in Greenwich, einem Vorort von London. Von dort aus zählt man entweder in westliche oder in östliche Richtung, bis man 180° erreicht. Dabei gilt, dass 180° westliche Länge 180° östlicher Länge entspricht (Abbildung 2.2.3 und 2.2.4).

Sehr ähnlich geht man bei den Winkeln im Planetarium vor, nur dass man sie anders nennt. Die geografische Breite heißt dann Polarwinkel, und die geografische Länge heißt Azimut. Die Halbgerade, die vom Zentrum des Planetariums ausgeht, muss entsprechend um diese beiden Winkel gedreht werden. So kann man jeden Punkt am Planetariumhimmel erreichen.

Es gibt viele verschiedene Koordinatensysteme, vor allem weitere krummlinige Koordinatensysteme wie die Zylinderkoordinaten, die an eine Zylindersymmetrie angepasst sind. Solche Koordinaten eignen sich für Räume, die eine Form haben wie eine Säule oder in Systemen, die rotieren. Dann wählt man die Zylinderachse entlang der Rotationsachse des Systems.

Um die Lage eines Punktes im Raum angeben zu können, müssen wir messen. Und das geht nur, wenn wir entlang der Raumachsen oder auch krummen Linie eine **Längenskala** definiert haben. Wir müssen Abstände im Raum eichen, z. B. einen Meter als Maßstab verwenden. Diese Referenzlänge können wir z. B. an einem Meterstab ablesen. Irgendwann muss man sich auf eine solche Referenzlänge geeinigt haben. Dass es da durchaus viele Möglichkeiten gibt, zeigen die verschiedenen Längenmaße in unterschiedlichen Ländern, z. B. Kilometer versus Meile oder Fuß, Elle und Meter. Das Meter leitet sich vom griechischen Wort *metron* ab und bedeutet „Maß“ oder „Länge“. Es ist eine Standardeinheit im Système International und damit eine sogenannte SI-Einheit. Die internatio-

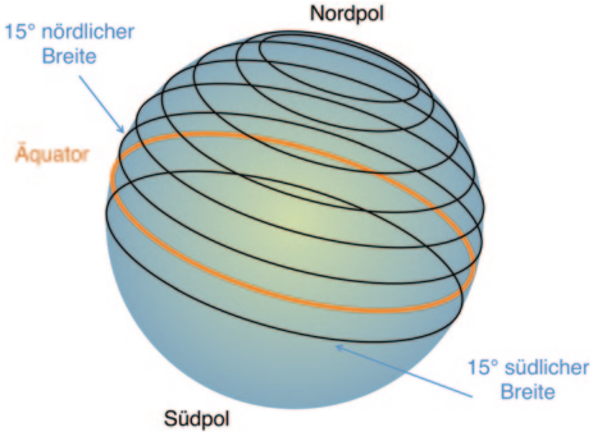

Abb. 2.2.3 Globus mit Breitenkreisen. Es handelt sich um Großkreise, mit denen auf einer Kugeloberfläche nördliche oder südliche Breite angegeben werden können.© A. Müller

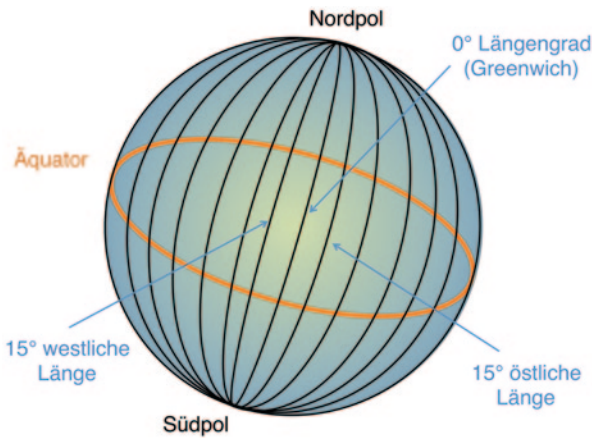

Abb. 2.2.4 Globus mit Längenkreisen. Zusätzlich zu den Breitenkreisen gibt es Großkreise, die westliche oder östliche Länge markieren. Erst beide Angaben zusammen – geografische Breite und geografische Länge – legen eindeutig einen Punkt auf der Kugeloberfläche fest. © A. Müller

nal festgelegte Abkürzung für Meter ist m. Die Verwendung als einheitliches Längenmaß verdanken wir den Franzosen, die das Meter im 18. Jahrhundert einführten. In Paris lagerte auch das sogenannte *Urmeter*, ein Stab aus dem Metall Platin, das bis 1889 den Standard definierte, was die Länge von einem Meter sei. Wie sich herausstellte, war diese Referenz ein recht ungenauer Maßstab, und so wurde der Meterstandard immer wieder neu definiert. Heutzutage hat man sich von konkreten Gegenständen als Referenz verabschiedet und benutzt die Vakuumlichtgeschwindigkeit, um das Meter sehr genau festzulegen. Ein Meter ist definiert als die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer Zeit von 1 / 299.792.458 Sekunden zurückgelegt. Wie in den Natur-, Ingenieurswissenschaften und der Technik üblich, werden die üblichen Präfixe verwendet, um Vielfache von Einheiten anzugeben. In Bezug auf das Meter sind dabei gebräuchlich: 1 km = 1000 m (Kilometer), 1 dm = 10^{-1} m (Dezimeter), 1 cm = 10^{-2} m (Zentimeter), 1 µm = 10^{-6} m (Mikrometer), 1 nm = 10^{-9} m (Nanometer), 1 pm = 10^{-12} m (Pikometer) und 1 fm = 10^{-15} m (Femtometer). Natürlich ist die Festlegung eines Standardlängenmaßes reine Willkür. Neben der Längeneinheit Meter wurden je nach Fachgebiet weitere Einheiten eingeführt, die in der Praxis verwendet werden. Die gebräuchlichsten Längeneinheiten fasst die folgende Tabelle 2.1 zusammen.

2.3 Der Weltraum

Nach unserer Erfahrungswelt gibt es für den Raum keine Grenze. Der Raum hört jenseits der Erde nicht auf. Spätestens die Landung der Menschen auf dem Mond im Jahr 1969 belegte, dass der Raum – alle drei Dimensionen – auch jenseits der Erde existiert. Im Weltraum gibt es auch die drei Raumdimensionen, und es ist ein interessanter und nicht leicht zu führender Nachweis, ob das auch in beliebig großer Entfernung oder bei beliebig kurzen Abständen gilt.

Tab. 2.1: Gebräuchliche Längeneinheiten.

Name	Abkürzung	in Metern
Parallaxensekunde	pc	$3{,}09 \times 10^{16}$
Lichtjahr	Lj; internat.: lyr	$9{,}46 \times 10^{15}$
Astronomische Einheit	AE; internat.: AU	$1{,}50 \times 10^{11}$
Seemeile	sm	1852
Meile	mi	1482
Kilometer	km	1000
Meter	m	1
Fuß	ft	0,3
Zentimeter	cm	0,01
Millimeter	mm	0,001
Mikrometer	µm	10^{-6}
Nanometer	nm	10^{-9}
Angström	Å	10^{-10}
Femtometer	fm	10^{-15}
Planck-Länge	l_{Pl}	$1{,}6 \times 10^{-35}$

In der Kosmologie kennt man das sogenannte *kosmologische Prinzip*. Es besagt, dass alle Naturgesetze, die auf der Erde gelten, auch für das gesamte Universum gelten müssen. Das ist freilich zunächst eine Annahme, aber wie ihre rigorose Verwendung gezeigt hat, ist es eine Voraussetzung, die den Naturwissenschaften Erfolg bescherte. Es macht also Sinn, davon auszugehen, dass auch der Weltraum von drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension aufgespannt wird. Raum und Zeit sind auch im Weltall die Bühne für das kosmische Geschehen.

In der Astronomie ist man daran interessiert, die Position eines Gestirns am Himmel zu charakterisieren. Das Himmelsgewölbe ist eine Himmelssphäre: Wir überblicken von unserem Beobachtungsstandort auf der Erde aus von innen eine Halbkugel, nämlich den momentan sichtbaren Himmel – wie im oben beschriebenen Planetarium. In der Astronomie heißen die beiden Winkel wiederum anders: Der Polarwinkel heißt Deklination, und der Azimut heißt Rektaszension. So kann man einen Punkt am Himmel eindeutig festlegen – das sind wieder zwei Raumdimensionen (wie in Abbildung 2.2.2). Darüber hinaus hat das Gestirn auch eine räumliche Entfernung, die sich in die Tiefe des Weltraums erstreckt – das ist die dritte Raumdimension. Es ist eine der Aufgaben der Astronomie, Methoden zur Entfernungsbestimmung zu finden und anzuwenden. Im Kapitel 4.8 werden wir darauf wieder zurückkommen.

2.4 Newtons absoluter Raum

Wenn wir vom Raum sprechen und Gegenstände im Raum lokalisieren möchten, benötigen wir, wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, die drei Raumkoordinaten. Um die drei Zahlenangaben hinschreiben zu können, müssen wir sie **relativ zu einem Bezugspunkt** messen, d. h. einen Nullpunkt willkürlich festgelegt haben. Außerdem benötigen wir eine geeignete **Längenskala**. Das klingt so selbstverständlich, dass man sich darüber im Alltag keine Gedanken macht. Der „gesunde Menschenverstand“ und Alltagserfahrungen machen es einem nicht leicht, in das Wesen von Raum und Zeit vorzudringen. Wir erleben Raum und Zeit als etwas Unbeeinflussbares, das alle auf gleiche Weise erfahren, was unsere Begriffe von absolutem Raum und absoluter Zeit prägte. Darauf basiert die Newton’sche Mechanik, der wir uns nun zuwenden wollen. Es handelt sich um eine erfolgreiche Beschreibung von sehr einfachen Bewegungsvorgängen. Den Umgang mit der Mechanik lernen schon Kinder in der Schule. Wir gehen dabei ganz selbstverständlich mit Raum und Zeit um und stellen einfache Berechnungen an. Dieses elementare Wissen ist auch im Alltag recht nützlich, wie das folgende Beispiel illustriert. Abbildung 2.4.1 zeigt einen Bus, der mit gleichbleibender Geschwindigkeit in einer Richtung immer geradeaus fährt. Er möge eine Geschwindigkeit von 50 km/h haben. An der Einheit der

Geschwindigkeit „Kilometer pro Stunde“ können wir unmittelbar ein Gesetz der Mechanik ablesen: *Geschwindigkeit* ist gleich Weg durch Zeit.

In einem Weg-Zeit-Diagramm ist die Geschwindigkeit einfach die Steigung der Geraden (mathematisch: Die erste Ableitung des Weges nach der Zeit). Das zeigt Abbildung 2.4.2. Je steiler die Gerade, desto schneller ist das bewegte Objekt (Abbildung 2.4.3).

In der Mechanik lässt sich weiterhin der Begriff der *Beschleunigung* (mathematisch: die zweite Ableitung des Weges nach der Zeit, also die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit) einführen. Es handelt sich dabei um eine Geschwindigkeitszunahme (oder -abnahme; dann ist es eine Abbremsung) pro Zeitintervall. Deshalb hat die Beschleunigung die Einheit Weg pro Zeit zum Quadrat. Eine wichtige Klasse von beschleunigten Bewegungen ist die gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Das geschieht beispielsweise bei Körpern im Schwerefeld der Erde. Sie werden durch die Erdbeschleunigung in jeder Sekunde um eine Geschwindigkeit von ungefähr zehn Metern pro Sekunde beschleunigt. (Irgendwann erreicht diese Beschleunigung einen Maximalwert, weil die Luftreibung eine weitere Abbremsung bewirkt. Vernachlässigt man die Luftreibung, ist dann ist die Beschreibung mit der gleichmäßigen Beschleunigung eine sehr gute Näherung.) Die Beschleunigung ist ein gutes Thema, um zur Schwerkraft überzuleiten. Der italienische Naturforscher Galileo Galilei (1564–1642) und der englische Physiker und Mathematiker Sir Isaac Newton (1643–1727) gehören hier zu den großen Naturwissenschaftlern, die die Mechanik und die Schwerkraft auch quantitativ akribisch erforscht haben und auf Naturgesetze gestoßen sind. Galileis Fallexperimente, die er am Schiefen Turm von Pisa durchführte, sind ebenso legendär wie seine Experimente mit Pendeln und von rollenden Körpern auf der schiefen Ebene. Er entdeckte, dass man komplexe Bewegungen auch aus der Überlagerung von einfachen Bewegungen beschreiben kann (Superpositionsprinzip), und er berechnete u. a. die Parabelbahn von im Schwerefeld der Erde geworfenen Körpern. Newton muss als ebenbürtiges Genie bezeichnet werden. Er begründete, zeitgleich mit Gottfried Wilhelm

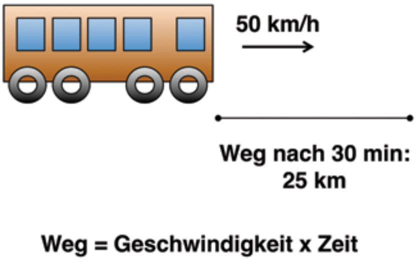

Abb. 2.4.1 Ein Bus fährt mit einer gleichbleibender Geschwindigkeit von 50 km/h immer geradeaus. Nach 30 Minuten Fahrt hat er 25 Kilometer zurückgelegt. Geschwindigkeit entspricht Weg pro Zeit. © A. Müller

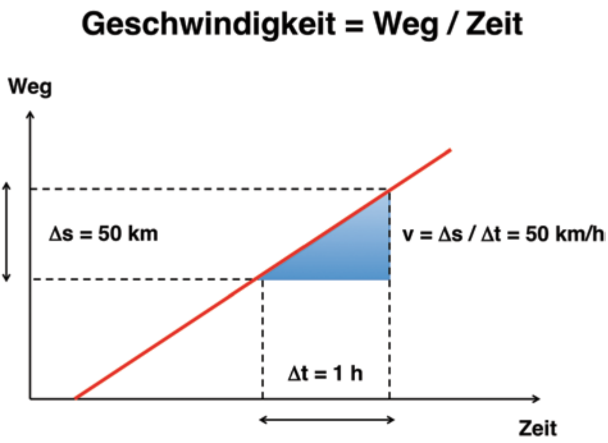

Abb. 2.4.2 In diesem Weg-Zeit-Diagramm ist die Geschwindigkeit einfach die Steigung der Geraden. Wenn das Fahrzeug sich gleichförmig geradlinig bewegt und nach einer Stunde 50 Kilometer zurückgelegt hat, so fährt es folgerichtig 50 km/h.© A. Müller

Leibniz (1646–1716), die Differenzial- und Integralrechnung, ein bis heute unverzichtbares mathematisches Werkzeug für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Viele Gesetze der Mathematik und Physik fasste Newton in seinem wegweisenden Monumentalwerk

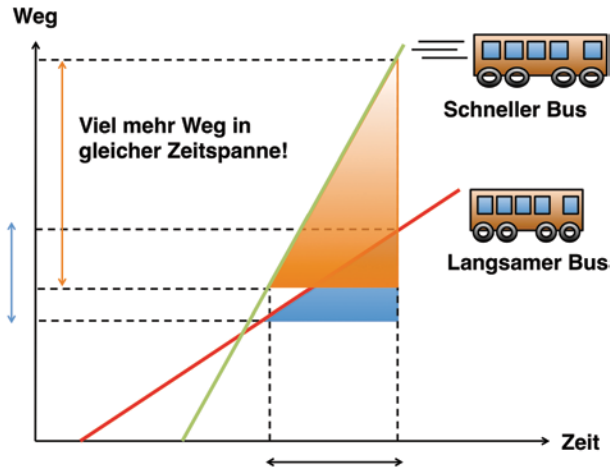

Abb. 2.4.3 Zwei gleichförmig geradlinig bewegte Körper, z. B. Busse, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Weg-Zeit-Diagramm. Der Schnellere von beiden legt im gleichen Zeitintervall mehr Weg zurück. Je steiler die Gerade, desto schneller ist das bewegt Objekt. © A. Müller

Philosophiae naturalis principia mathematica zusammen. Newton soll „die Schwerkraft erfunden haben", als er unter einem Baum saß und ihm ein Apfel auf dem Kopf fiel – das muss sicherlich als Mythos betrachtet werden. Mythen entstehen nicht umsonst von berühmten Persönlichkeiten, denn was Newton gelang, kann nicht genug gelobt werden. Er kann als einer der Gründervater dessen angesehen werden, was später in der Physik Unifikation (Vereinheitlichung) genannt wurde. Newton war kühn genug vorauszusetzen, dass die Gesetze auf der Erde auch am Himmel gelten. Das war keineswegs selbstverständlich zu damaliger Zeit, war der Himmel doch der Ort der Götter, wo „göttliche Gesetze" regieren. Ende des 17. Jahrhunderts gelang es Newton, die von Johannes Kepler (1571–1630) gemachten Beobachtungen der Bewegungen von Gestirnen physikalisch zu erklären. Er folgerte nämlich, dass es eine anziehende Kraft zwischen der Sonne und den Planeten geben müsse. Seinen Berechnungen zufolge musste diese Kraft mit der Entfernung ab-nehmen, präzise gesagt mit dem Abstand zum Quadrat. Newton hatte das Gesetz der Schwerkraft entdeckt! Diese Kraft spüren generell Massen untereinander, und deshalb ziehen sie sich an. Betrachten wir vereinfachend nur zwei Massen. Entfernt man die beiden voneinander, so nimmt die Gravitationskraft ab, bei Verdopplung des Abstands ist es nur noch ein Viertel der Kraft; bei Vervierfachen der Entfernung ist es nur noch ein Sechzehntel usw. Es gibt bei diesem Kraftgesetz eine Proportionalitätskonstante, die experimentell bestimmt werden muss. Sie heißt zu Newtons Ehren Newton'sche Gravitationskonstante und ist – wie wir später besprechen (Kapitel 5.2) werden – die Kopplungskonstante der Gravitation.

Wie sich später – mit der Relativitätstheorie im 20. Jahrhundert –, herausstellte, gilt die Newton'sche Gravitation nur im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten (gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit) und für nicht allzu kompakte Massen (gegenüber einem Schwarzen Loch). Ob die Newton'schen Gravitationsgesetze auch bei den sehr kleinen Abständen der atomaren und subatomaren Welt, also im Regime der Quantenphysik, gelten, wird mit verschiedenen Experimenten untersucht. Bislang beschreiben sie auch die Welt im Kleinen sehr gut. Darauf werden wir noch genau im Kapitel 5 zu sprechen kommen.

Auf Newton gehen auch weitere, wichtige Bewegungsgesetze zurück. Heute lernt man sie in der Schule als *Newton'sche Gesetze*. Sie heißen Trägheitsgesetz (1. Newton'sches Gesetz), Aktionsprinzip oder dynamisches Grundgesetz (2. Newton'sches Gesetz) und Reaktionsprinzip (3. Newton'sches Gesetz). Es lohnt sich, das Trägheitsgesetz etwas genauer zu besprechen. Mit Trägheit bezeichnen die Physiker in der Mechanik den Widerstand, den eine Masse entgegensetzt, wenn man sie aus ihrem derzeitigen Bewegungszustand bringen will. Wir kennen alle morgens das Gefühl, dass man gar nicht aufstehen möchte – Massen geht es da ganz ähnlich. Es muss zunächst die Trägheit der Masse überwunden werden, um sie vom Ruhezustand in Bewegung zu bringen. Das gleiche Spiel passiert, wenn sich die Masse bewegt und abgebremst werden soll. Die Masse tendiert dazu, ihren Bewegungszustand beizubehalten. Crashtest-

Dummys können ein Lied davon singen. In voller Schönheit lautet das 1. Newton'sche Gesetz prosaisch formuliert: „*Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder gleichförmig geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch von außen wirkende Kräften gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.*"

Newtons 2. Gesetz ist das Aktionsprinzip oder das dynamische Grundgesetz. In seiner später geläufigen Form F = ma ist es den meisten Schülern bekannt. Es besagt, dass die beschleunigende Kraft F sich ergibt aus dem Produkt von beschleunigter Masse m und Beschleunigung a. Eigentlich steckt hier schon eine Annahme drin, nämlich dass sich die Masse zeitlich nicht ändert – was in den meisten Alltagsbeispielen auch gilt. Das gilt nicht bei einer beschleunigenden Rakete, die beim Flug infolge des Treibstoffverbrauchs an Masse verliert. In seiner allgemeingültigen Form bedeutet das Gesetz, dass die zeitliche Ableitung des Impulses gleich der Kraft ist.

Schließlich haben wir noch das Reaktionsprinzip. Es wird manchmal knapp als *actio gleich reactio* umschrieben und heißt, dass von einem Körper bei einer auf ihn wirkenden Kraft (*actio*) eine gleich große, aber entgegengesetzt wirkende Kraft (*reactio*) ausgeht.

In der Mechanik kann man ausgedehnte Massen sehr trickreich beschreiben. Man stellt sich einfach vor, dass die gesamte Masse des Körpers in seinem Schwerpunkt vereint ist und beschreibt dann Bewegungen des Körpers, als ob er eine Punktmasse sei. Das ist zwar eine drastische Vereinfachung, aber dennoch beschreibt es die Bewegung recht gut und taugt auch für Vorhersagen.

Halten wir fest: Wir verwenden in den hier beispielhaft dargestellten mechanischen Problemen die Länge und Zeit ganz selbstverständlich als „festen Grundrahmen" zur Beschreibung des Problems. In der klassischen Mechanik sind sowohl der Raum als auch die Zeit absolut, d. h. unbeeinflussbar. Sie sind selbst nicht dynamischer Gegenstand der Betrachtung.

Kann es einen „Raum an sich" – Raum in Abwesenheit von allem anderen – geben? Das ist fast schon eine philosophische Frage. Wodurch wäre dieser „Raum an sich" charakterisiert? Es klingt nach einem „perfekten Nichts", mit dem man auch nichts anfangen kann. Wenn wir einmal genau betrachten, wie wir von Raum reden und wie wir ihn charakterisieren, dann finden wir immer Bezugsobjekte im Raum, sprich Materie. Wie Bojen auf dem Meer, benötigen wir Testteilchen im Raum, um Raum zu definieren. Raum hat einen *relationalen* Charakter, weil er von den Dingen im Raum abhängt. Das ist ein vielversprechender Ansatz: ohne Materie kein Raum. Und ohne Raum gibt es keine „Bühne" für die Materie. Diese Überlegungen führen uns geradewegs zum sogenannten **Mach'schen Prinzip**. Dieses Prinzip ist benannt nach dem österreichischen Physiker Ernst Mach (1838–1916). Den Namen Mach verbinden wir übrigens mit der Machzahl und der Mach'schen Geschwindigkeit. Fliegt ein Düsenjet mit Machzahl 1, so hat er gerade die einfache Schallgeschwindigkeit im Medium Luft erreicht – ca. 330 m/s; bei Mach 2 ist es die doppelte Schallgeschwindigkeit usw. Im Kern besagt nun das Mach'sche Prinzip, dass es keinen absoluten Raum gibt, gegenüber dem die Bewegung eines Körpers zu beschreiben wäre. Vielmehr macht es nur Sinn, die Bewegung von Körpern untereinander zu beschreiben, d. h. die Bewegung eines Körpers in Bezug auf einen anderen Körper. **Relativbewegungen** sind entscheidend. Das war ein wichtiger Ansatzpunkt für Albert Einstein, der Anfang des 20. Jahrhunderts die Relativitätstheorie veröffentlichte (Kapitel 4). Wie sich im Rahmen der Relativitätstheorie herausstellte, ist der Vergleich von Bezugssystemen (Kapitel 3.8, Kasten „Bezugssystem, Inertialsystem, Relativitätsprinzip") relativ zueinander wesentlich, um die Physik zu beschreiben. Diese Sichtweise stimmt bis heute hervorragend mit den experimentellen Beobachtungen überein und hat sich somit bewährt.

http://www.springer.com/978-3-8274-2858-5

Raum und Zeit
Vom Weltall zu den Extradimensionen - von der Sanduhr zum Spinschaum
Müller, A.
2013, VIII, 209 S., Softcover
ISBN: 978-3-8274-2858-5