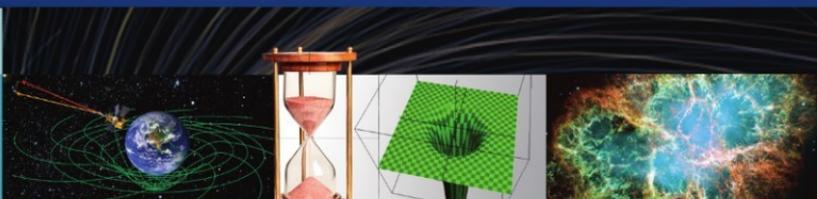


Andreas Müller

Raum und Zeit

Vom Weltall zu den Extradimensionen –
von der Sanduhr zum Spinschaum

Astrophysik aktuell



Springer Spektrum

Raum und Zeit

Erlebe Schönes und vergiss die Zeit.

Andreas Müller

Raum und Zeit

Vom Weltall zu den Extradimensionen –
von der Sanduhr zum Spinschaum



Springer Spektrum

Dr. Andreas Müller
Technische Universität München
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstr. 2
85748 Garching

ISBN 978-3-8274-2858-5

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Vera Spillner, Stefanie Adam

Einbandabbildung: Hauptbild: © Mag. Dr. Werner Benger; Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Berlin; Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Potsdam; Center for Computation & Technology at Louisiana State University, USA; Institute for Astro- and Particle Physics at University of Innsbruck, Austria. Bildreihe links: © James Overduin, Pancho Eckels and Bob Kahn, Sanduhr: © Dmitry Rukhlenko – Fotolia.com, Bildreihe Mitte: Andreas Müller, Bildreihe rechts: NASA, ESA and J. Hester (Arizona State University)

Einbandentwurf: SpieszDesign, Neu-Ulm

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de

Vorwort

Raum und Zeit scheinen uns so vertraut und selbstverständlich, dass wir uns gewöhnlich keine Gedanken darüber machen. Doch hat die Entwicklung der Physik gelehrt, dass es sich bei genauer Betrachtung ganz anders damit verhält, als die alltägliche Erfahrung suggeriert. Wie wir seit Einsteins „Wunderjahr“ 1905 wissen, existieren Raum und Zeit nicht absolut und für sich selbst, sondern bilden eine Einheit – die Raumzeit. Und zehn Jahre später erkannte er, dass die Raumzeit selbst am dynamischen Geschehen teilnimmt und sich aus ihrer Krümmung die Effekte der Schwerkraft geometrisch verstehen lassen. Auf einfachen Prinzipien beruhend, erklären die Einstein'schen Feldgleichungen alle mit der Gravitation zusammenhängenden Beobachtungen, von der Planetenbewegung bis zur Expansion des Universums nach dem Urknall. Und das so genau, dass bis heute keine Messung eine Abweichung feststellen konnte.

Dennoch deuten zahlreiche Hinweise auf einen bevorstehenden Umbruch der Physik. Trotz ihrer überwältigenden Erfolge sind die Einstein'sche Theorie, welche die Physik bei großen Abständen beschreibt, und die Quantenmechanik (bzw. die Quantenfeldtheorie), welche für die physikalischen Vorgängen im Kleinen verantwortlich ist, unvollständig und möglicherweise sogar inkonsistent – u. a. schon deshalb, weil die beiden Theorien in ihrer gegenwärtigen Form einfach nicht zusammenpassen wollen! Die Suche nach einer Theorie der Quantengravitation, welche beide zusammenführen

und ihre inneren Widersprüche auflösen soll, ist so zur größten Herausforderung der theoretischen Physik geworden. Aber trotz einer kollektiven intellektuellen Anstrengung ohne Beispiel in der Geschichte der Physik, an der sich weltweit viele theoretische Physiker beteiligen, sind wir der „richtigen“ Theorie bis jetzt kaum näher gekommen.

Das vorliegende Buch führt den Leser an die Vorderfront der aktuellen Forschung. Nach einem ausführlichen Streifzug durch die Geschichte der Physik von Raum und Zeit bis zu ihrer Vereinigung in der Raumzeit, bei dem auch neueste Erkenntnisse (wie z. B. Dunkle Energie und Gravitationswellen betreffend) zur Sprache kommen, wendet es sich einigen der Ansätze zu, welche heute bei der Suche nach der Quantengravitation verfolgt werden. Neben der Stringtheorie, dem vielleicht aussichtsreichsten Ansatz, gehören dazu u. a. die Schleifenquantengravitation und Modelle, welche die Existenz weiterer Dimensionen der Raumzeit postulieren. Die Herausforderung, deren z. T. sehr esoterisches Formelwerk in eine verständliche Sprache zu übersetzen, hat Andreas Müller hervorragend gemeistert. So wird der Leser viel Spaß an dieser „Momentaufnahme“ der aktuellen Forschung haben.

Hermann Nicolai
(Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Golm)

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
2 Der Raum	3
2.1 Raum im Alltag	3
2.2 Raumkoordinaten und Raumskala	4
2.3 Der Weltraum	9
2.4 Newtons absoluter Raum	11
3 Die Zeit	19
3.1 Zeit im Alltag	19
3.2 Historisches	22
3.3 Zeitmessung und Uhren	24
3.4 Blicke in die Vergangenheit	39
3.5 Zeitpfeile	43
3.6 Blick zurück: Kosmos der Teilchen und Quanten	55
3.7 Blick nach vorn: Kalter, dunkler Kosmos	65
3.8 Galileis absolute Zeit	75
4 Die Raumzeit	79
4.1 Licht und die Spezielle Relativitätstheorie	79
4.2 Minkowskis flache, vierdimensionale Welt	83

4.3	Einsteins neue Gravitation: Allgemeine Relativitätstheorie	86
4.4	Zeit und Länge sind relativ	91
4.5	Die Raumzeit der Sonne und der Erde	96
4.6	Die Raumzeit kompakter Objekte	105
4.7	Wellen der Raumzeit: Gravitationswellen	108
4.8	Die Raumzeit des Universums	111
4.9	Singularitäten der Raumzeit	118
5	Das neue Wesen von Raum und Zeit?	125
5.1	Jenseits bewährter Theorien	125
5.2	Mehr Raum? Räumliche Extradimensionen	128
5.3	Gibt es Längen- oder Zeitquanten?	134
5.4	Ausblick auf die Forschung	142
6	Gedanken zum Schluss	151
6.1	Was war vor dem Urknall?	151
6.2	Auf der Spur nach dem Wesen von Raum und Zeit	160
6.3	Die drei Verständnisebenen für Raum und Zeit	166
	Glossar	169
	Abbildungsverzeichnis	185
	Danksagungen	193
	Quellen und weitere Literatur	195
	Index	199

Einführung

Raum und Zeit nehmen wir im Alltag als etwas Selbstverständliches wahr. Der Raum, das sind die drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe. Sie bilden die „Bühne“, auf der wir uns bewegen. Die Zeit ist das, was beständig verstreicht und was wir auf unseren Uhren ablesen können. Beides erleben wir als etwas Unbeeinflussbares, das wir so, wie es ist, hinnehmen müssen. Beides bestimmt unser Leben und unser Planen.

Es ist nun eine spannende Frage, ob wir das Wesen von Raum und Zeit begriffen haben, wenn wir von dem ausgehen, was wir davon im Alltag erleben. Die Physik der gut letzten hundert Jahre lehrt uns, dass Raum und Zeit viel mehr sind. Mittlerweile haben präzise Experimente den Nachweis erbracht, dass wir Raum und Zeit nicht getrennt voneinander betrachten dürfen, sondern sie als Raum-Zeit-Kontinuum oder kurz Raumzeit verstehen müssen. Dieses vierdimensionale Gebilde ist jedoch nichts Unveränderliches, sondern wird von Energieformen wie der Masse beeinflusst, man darf sogar sagen, geformt.

Ist es damit getan? Die moderne Forschung in der Physik legt nahe, dass wir auch damit nicht vollständig das Wesen von Raum und Zeit erfasst haben. Seit einigen Jahren kursieren sehr unterschiedliche physikalische Modelle und Theorien, die über das Konzept der kontinuierlichen Raumzeit hinausgehen. Vielleicht gibt es weitere Raumdimensionen neben den klassischen drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe? Vielleicht sind Raum und Zeit selbst

zerhackt, und es gibt eine Mindestlänge im Raum sowie eine Mindestzeitspanne, die beide fundamental sind und nicht unterschritten werden können? Sollte das so sein, wie könnte man das dann in einem Experiment überprüfen?

Welche Konsequenzen müssen wir aus solchen Experimenten und Tests ziehen? Was sagen uns derartige Beobachtungen über das Wesen von Raum und Zeit? Welchen praktischen Nutzen könnte das haben?

In diesem Buch soll es um die Konzepte von Raum und Zeit gehen, wie es uns die Naturwissenschaften, insbesondere Physik und Astronomie, nahe legen. Wir unternehmen nach der Zusammenfassung des klassischen Weltbilds und der Vorstellung des aktuellen Weltbildes den Versuch, in die wissenschaftlich spekulativen Bereiche vorzudringen, die womöglich eine „Physik von morgen“ darstellen könnten. Bei aller Naturwissenschaft soll nicht zu kurz kommen, welche Bedeutung diese Erkenntnisse für unser Verständnis von der Welt und unser Selbstverständnis als in Raum und Zeit gefangene Menschen haben kann.

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

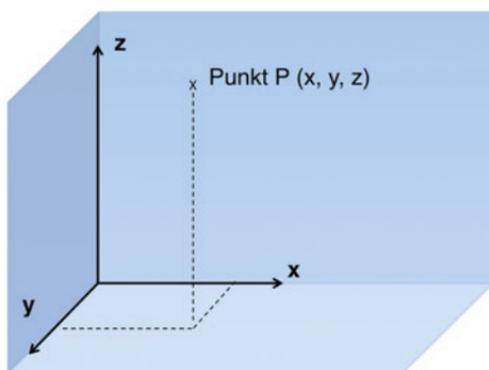


Abb. 2.2.1 Drei senkrecht aufeinanderstehende Raumachsen bilden ein „Zimmer“, einen dreidimensionalen Raum. Ein beliebiger Punkt P im Raum wird durch die Angabe von drei Zahlen (x, y, z) eindeutig festgelegt, von denen man jeweils eine an der betreffenden Achse ablesen kann. Die drei Zahlen, Mathematiker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

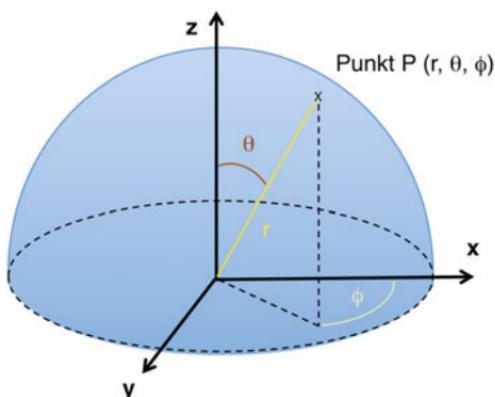


Abb. 2.2.2 Für einen halbkugelförmigen Raum, z. B. ein Planetarium, bietet sich ein anderes Koordinatensystem an, das an die Kugelform angepasst ist: Kugelkoordinaten. Ein beliebiger Punkt P im Raum wird hier eindeutig durch seinen Abstand vom Kugelzentrum, dem Radius r , sowie zwei Winkeln, dem Azimut 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 $+90^\circ$ 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 Systeme International und damit eine sogenannte SI-Einheit. Die internatio-

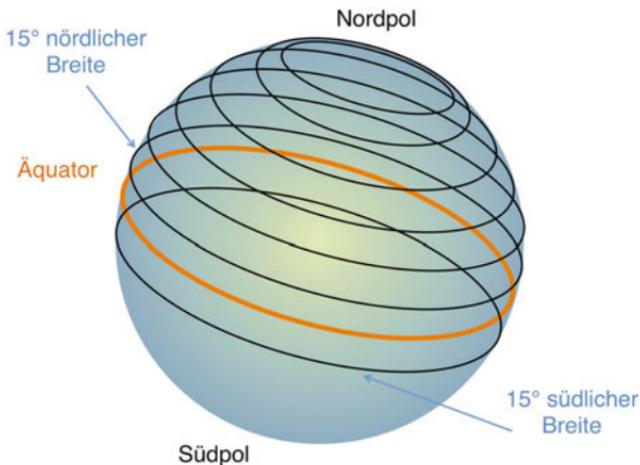


Abb. 2.2.3 Globus mit Breitenkreisen. Es handelt sich um Großkreise, mit denen auf einer Kugeloberfläche nördliche oder südliche Breite angegeben werden können. © A. Müller

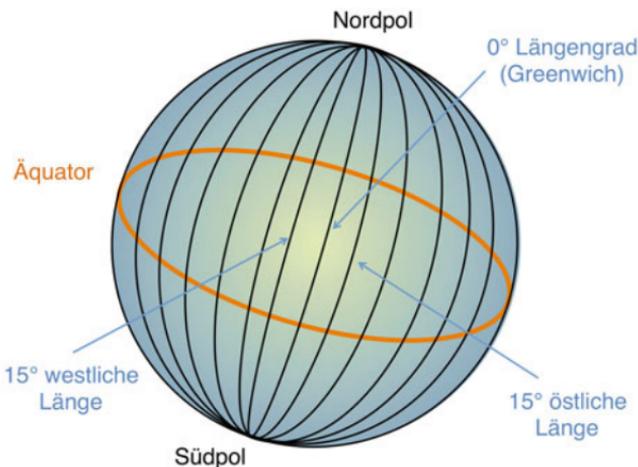


Abb. 2.2.4 Globus mit Längengraden. Zusätzlich zu den Breitenkreisen gibt es Großkreise, die westliche oder östliche Länge markieren. Erst beide Angaben zusammen – geografische Breite und geografische Länge – legen eindeutig einen Punkt auf der Kugeloberfläche fest. © A. Müller

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-, Ingenieurwissenschaften und der Technik üblich, werden die üblichen Präfixe verwendet, um Vielfache von Einheiten anzugeben. In Bezug auf das Meter sind dabei gebräuchlich: $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$ (Kilometer), $1 \text{ dm} = 10^{-1} \text{ m}$ (Dezimeter), $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ (Zentimeter), $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ (Mikrometer), $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ (Nanometer), $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ (Pikometer) und $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (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 Himmelskugel: Wir überblicken von unserem Beobachtungsstandort auf der Erde aus von innen eine Halbkugel, nämlich den momentan sichtbaren Himmel – wie im oben beschriebenen Pla-

netarium. 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 Schwerfeld 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 Schwerfeld der Erde geworfenen Körpern. Newton muss als ebenbürtiges Genie bezeichnet werden. Er begründete, zeitgleich mit Gottfried Wilhelm