

Knau[®]

Sachbuch

**ISAAC
ASIMOV**

**Die Wunder
des Kosmos und
der Erde**



geht. Ziel dieses Buches ist, dem Leser diese allgemeinen Fragen näherzubringen, indem die Antworten darauf in einer Sprache gegeben werden, der jeder folgen kann, so daß auch die komplizierten Probleme des Kosmos völlig verständlich werden.

Natürlich führt eine Frage gewöhnlich zur nächsten. Das Wissen über die Welt ist keine gerade Linie, sondern ein miteinander verknüpftes dreidimensionales Netz, so daß die Beantwortung einer bestimmten Frage es manchmal erfordert, vorher etwas anderes zu erklären, was dann wiederum die Erklärung eines anderen Problems notwendig macht, usw. Ich werde mich jedoch bemühen, die Fäden so sorgfältig wie möglich zu entwirren, damit nicht zuviel auf einmal erklärt werden muß. Trotzdem wird es ab und zu wohl notwendig sein, ein wenig hin und her zu springen, wofür ich um Verständnis bitte. Wenn wir von einem Problem zum nächsten voranschreiten, wird bloßes Überlegen in manchen Fällen nicht ausreichen; wir werden auch ein wenig darüber erfahren müssen, was Wissenschaftler beobachtet und gefolgt haben. Ich werde aber versuchen, diese wissenschaftliche Tätigkeit besonders behutsam und möglichst ohne komplizierte mathematische Formeln oder Diagramme zu beschreiben. Denken führt immer zu weiterem Denken – ein Prozeß, der sich unendlich fortsetzt. Für jemanden, der gerne nachdenkt, ist dies der besondere Reiz der Wissenschaft. Wer sich jedoch nicht gerne über Dinge den Kopf zerbricht, die ihn nicht unmittelbar betreffen, den wird die Notwendigkeit, immer weiter nachdenken zu müssen, ungeheuer erschrecken. Sie gehören hoffentlich zu der ersten Gruppe.

Beginnen wir also gleich mit der eingangs gestellten Frage

1. Welche Form hat die Erde?

Zunächst wird man sich umsehen und dabei feststellen, daß die Erde ungleichmäßig geformt ist und sich in ihrer Form nicht leicht beschreiben läßt. Selbst wenn man Gebäude und andere künstliche Objekte so wenig berücksichtigt wie Lebewesen, hat man immer noch eine unebene Oberfläche aus nacktem Fels und Erdreich.

Unsere erste Schlußfolgerung würde also lauten, die Erde sei ein klumpiges Objekt mit Bergen und Tälern, Felsen und Schluchten. In Regionen wie Colorado, Peru oder Nepal, wo sich die Gebirge kilometerhoch auftürmen, ist die Unebenheit der Erde offensichtlich. Wer aber in bestimmten Teilen von Kansas, Uruguay oder der Ukraine lebt, sieht nicht viel von Bergen oder Tälern; er hat dort Ebenen vor sich, die ziemlich flach wirken.

Und selbst wenn man auf Hügel und Gebirge trifft, steigt die Erde zwar auf der einen Seite an, fällt aber dann zur anderen Seite hin wieder ab. Bei Tälern und Schluchten verhält es sich gerade umgekehrt. Kein Teil der Landfläche der Erde steigt an, ohne irgendwann wieder abzufallen, und kein Teil fällt ab, ohne jemals wieder anzusteigen. Vernünftigerweise läßt sich also daraus schließen, daß die Erde *im Durchschnitt* flach ist. Wenn man aber mit einem Boot so weit auf ein Gewässer hinausfährt, daß nirgends mehr Land zu sehen ist, bleibt nur noch der Blick auf die Wasseroberfläche. Diese Oberfläche ist voller Wellen und deshalb uneben. Bei Windstille sind diese Wellen jedoch nicht hoch; man kann dann leicht erkennen, daß die Wasseroberfläche im Durchschnitt flach ist. Wasser ist tatsächlich stets viel ebener als Land. Sinnvollerweise könnte man also annehmen, die Erde sei flach, was die Menschen auch über Jahrtausende hinweg glaubten. Da eine flache Erde

vernünftig erschien und man diese Auffassung ohne langes Nachdenken als sinnvoll erkannte, warum sollte jemand seine Zeit verschwenden und noch weiter darüber nachdenken? Haben Sie jemals auf einem Berg gestanden und das Tal zu ihren Füßen überblickt? Das Tal wirkt ziemlich flach. Sie können immer weiter in die Ferne hinausschauen, über Häuser, Bäume, Flüsse und andere Objekte hinweg, aber je weiter diese entfernt sind, desto weniger Einzelheiten können sie erkennen. Außerdem ist die Luft normalerweise nicht vollkommen klar; Rauch und Nebelfetzen verschleieren den ganz fernen Bereich, wo sich in einem bläulichen Dunst Himmel und Erde zu begegnen scheinen.

Die Stelle, an der Himmel und Erde aufeinandertreffen, wird (nach dem griechischen Wort für »Grenze«) als *Horizont* bezeichnet. Wenn man auf einen flachen Abschnitt der Erde blickt, erstreckt sich der Horizont gleichmäßig von links nach rechts; eine solche Linie nennt man deshalb *horizontal* oder waagrecht.

Nehmen Sie aber an, Sie schauen in eine andere Richtung auf einen Berg ganz in der Nähe. Sie können nicht über den Gipfel hinweg auf die dahinterliegende Seite blicken, denn dazu müßten Sie um die Ecke sehen können. Der Blick auf den Gipfel zeigt also nur den Himmel darüber und nicht, wie die Erde dahinter abfällt. Es ist eine scharfe Linie erkennbar, die ganz nah zu sein scheint und den Berg gegen den Himmel abgrenzt. Wenn Sie also einen ganzen Landstrich überblicken und dabei einen fernen, nebligen Horizont sehen, wissen Sie, daß Sie ein ziemlich flaches Gelände vor sich haben. Erkennen Sie aber einen scharfen Horizont ganz in der Nähe, so blicken Sie vermutlich auf einen Berggipfel.

Stellen Sie sich nun vor, Sie befinden sich an Bord eines Schiffes auf dem Meer. Es ist ein klarer, heller, sonniger Tag, die See ist ruhig. Die Luft über dem Meer ist normalerweise

weniger staubig und trüb als die Luft auf dem Festland, so daß man weit in die Ferne blickt. Und dennoch zeichnet sich der Horizont scharf ab. Das Meer berührt den Himmel entlang einer deutlichen horizontalen Linie. Sie haben eindeutig einen Gipfel vor sich.

Wie kann das der Fall sein? Auf hoher See gibt es keine Berge, nur flaches Wasser. Die einzige Möglichkeit besteht darin, daß der Ozean nicht eben, sondern gekrümmt ist. Von der Höhe des Schiffsdecks aus kann man nur bis zum Scheitelpunkt der Krümmung sehen, aber nicht darüber hinaus. Wenn Sie sich auf ein höher gelegenes Deck begeben, können Sie weiter in die Ferne blicken, bevor die Krümmung Ihnen die Sicht abschneidet; steigen Sie aber auf ein niedrigeres Deck hinab, so reicht Ihr Blick nicht so weit hinaus in die Ferne. Und wenn Sie sich von einem bestimmten Punkt aus umsehen, werden Sie in jeder Richtung denselben scharfen Horizont gleich weit entfeint erkennen; die Meeresoberfläche ist nämlich nicht nur gewölbt, sondern krümmt sich auch überall auf die gleiche Weise und gleich stark – jedenfalls soweit man mit bloßem Auge erkennen kann.

Doch warum sollte sich der Ozean wölben? Da er sich nach der Erdoberfläche richten muß, müßte die Erde selbst ebenfalls in jeder Richtung gekrümmt sein. An Land ist die Wölbung nicht so offensichtlich, weil das Land nicht so eben daliegt wie das Meer und die Luft normalerweise trüber ist. Wenn die Erde also gekrümmt ist, welcher Art ist dann diese Krümmung? Falls sie überall gleich stark ist, muß die Erde eine Kugel sein, denn nur eine Kugel besitzt eine Oberfläche, die sich in alle Richtungen gleich stark nach innen krümmt. So kann man allein schon durch aufmerksames Hinschauen und Nachdenken herausfinden, daß die Erde kugelförmig ist. Nun könnten Sie fragen, warum man den Horizont nicht schon vor Tausenden von Jahren studierte und zum gleichen

Beweise für die Kugelform der Erde zusammen. Obwohl diese Vorstellung damals nicht allgemein geteilt wurde, hat sie seither kein Gelehrter mehr ernsthaft in Zweifel gezogen. Im heutigen Raumfahrtzeitalter gibt es Aufnahmen aus dem Weltraum, auf denen die Erde tatsächlich als Kugel zu sehen ist.

Nehmen wir beispielsweise an, Sie befinden sich auf hoher See und erkennen in der Ferne ein Schiff, das auf den Horizont zu fährt. Sie behalten es im Auge, und während es sich dem Horizont nähert, verschwinden zuerst die unteren und später auch die oberen Decks aus ihrem Blickfeld. Zu sehen sind dann nur noch die Schornsteine (oder bei Segelschiffen die Segel), doch auch sie verschwinden schließlich. Dies hängt nicht nur mit der Entfernung zusammen; durch ein Fernglas erschiene das Schiff zwar größer und näher, aber trotzdem würde zuerst der untere Teil, danach der darüber liegende und schließlich der obere verschwinden. Sie sehen, wie das Schiff über den Scheitelpunkt der Erdkrümmung hinweg und auf der anderen Seite »abwärts« fährt.

Der erste Mensch, von dem bekannt ist, daß er die Erde für eine Kugel hielt, war der griechische Philosoph Pythagoras (um 580–500 v. Chr.), der seine Hypothese um 500 v. Chr. aufstellte. Es gibt noch weitere Beweise dafür, daß die Erde eine Kugel ist. Bestimmte Sterne sind von manchen Punkten auf der Erde sichtbar und von anderen nicht. Während einer Mondfinsternis fällt immer ein Erschatten auf den Mond, der wie der Rand einer Kugel gekrümmt ist. Der griechische Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) trug um 340 v. Chr. alle Ergebnisse nicht sorgfältig analysieren.

2. Welche Größe hat die Erde?

Solange die Menschen die Erde für flach hielten, brauchten sie sich über deren Ausdehnung keine großen Gedanken zu machen. Nach allem, was bekannt war, konnte sie sich unendlich weit ausdehnen, aber *Unendlichkeit* ist gedanklich nicht so leicht faßbar. Viel einfacher war die Vorstellung, daß sie eine bestimmte Größe hatte und irgendwo an ein Ende stieß. Selbst heute noch spricht man von Reisen »bis ans Ende der Welt«, doch dies ist nur mehr ein farbiger Ausdruck, der nicht wörtlich zu verstehen ist.

Selbstverständlich bringt der Gedanke an ein Ende der Welt Probleme mit sich. Was geschieht, wenn man eine weite Strecke zurückgelegt hat und schließlich das Ende erreicht? Kann man hinunterfallen? Wenn sich der Ozean bis ans Ende erstreckt, sollte er dann nicht ausfließen, bis alles Wasser verschwunden ist? Wer sich mit solchen Dingen befaßte, mußte begründen können, warum dies nicht eintrat. Vielleicht war die Welt von einem festen Wall aus hohen Bergen eingerahmt und sah damit wie eine Bratpfanne aus, aus der nichts herausfallen konnte? Vielleicht bestand der Himmel aber auch aus einem Stück fester Materie, das wie eine abgeflachte Halbkugel gewölbt war (was ihrem Aussehen ent-

Beweise für die Kugelform der Erde zusammen. Obwohl diese Vorstellung damals nicht allgemein geteilt wurde, hat sie seither kein Gelehrter mehr ernsthaft in Zweifel gezogen. Im heutigen Raumfahrtzeitalter gibt es Aufnahmen aus dem Weltraum, auf denen die Erde tatsächlich als Kugel zu sehen ist.

Schluß kam, aber das Problem ist, daß überhaupt nur wenige Leute über diese Frage nachdachten. Viel einfacher war es, sich die Erde als flach vorzustellen. In früheren Zeiten bereitete diese Vorstellung auch keinerlei Schwierigkeiten. Wie wir noch sehen werden, wirft eine runde Erde dagegen Probleme auf, die weiteres Nachdenken erfordern. Sie fragen vielleicht weiter: Können wir unseren Augen trauen? Genügt es, wenn wir den Horizont ansehen? In diesem Fall reicht es tatsächlich aus – auch wenn uns die Augen oft täuschen, solange wir die Ergebnisse nicht sorgfältig analysieren.

Nehmen wir beispielsweise an, Sie befinden sich auf hoher See und erkennen in der Ferne ein Schiff, das auf den Horizont zu fährt. Sie behalten es im Auge, und während es sich dem Horizont nähert, verschwinden zuerst die unteren und später auch die oberen Decks aus ihrem Blickfeld. Zu sehen sind dann nur noch die Schornsteine (oder bei Segelschiffen die Segel), doch auch sie verschwinden schließlich. Dies hängt nicht nur mit der Entfernung zusammen; durch ein Fernglas erschiene das Schiff zwar größer und näher, aber trotzdem würde zuerst der untere Teil, danach der darüber liegende und schließlich der oberste verschwinden. Sie sehen, wie das Schiff über den Scheitelpunkt der Erdkrümmung hinweg und auf der anderen Seite »abwärts« fährt.

Der erste Mensch, von dem bekannt ist, daß er die Erde für eine Kugel hielt, war der griechische Philosoph Pythagoras (um 580–500 v. Chr.), der seine Hypothese um 500 v. Chr. aufstellte.

Es gibt noch weitere Beweise dafür, daß die Erde eine Kugel ist. Bestimmte Sterne sind von manchen Punkten auf der Erde sichtbar und von anderen nicht. Während einer Mondfinsternis fällt immer ein Erschatten auf den Mond, der wie der Rand einer Kugel gekrümt ist. Der griechische Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) trug um 340 v. Chr. alle

2. Welche Größe hat die Erde?

Solange die Menschen die Erde für flach hielten, brauchten sie sich über deren Ausdehnung keine großen Gedanken zu machen. Nach allem, was bekannt war, konnte sie sich unendlich weit ausdehnen, aber *Unendlichkeit* ist gedanklich nicht so leicht faßbar. Viel einfacher war die Vorstellung, daß sie eine bestimmte Größe hatte und irgendwo an ein Ende stieß. Selbst heute noch spricht man von Reisen »bis ans Ende der Welt«, doch dies ist nur mehr ein farbiger Ausdruck, der nicht wörtlich zu verstehen ist.

Selbstverständlich bringt der Gedanke an ein Ende der Welt Probleme mit sich. Was geschieht, wenn man eine weite Strecke zurückgelegt hat und schließlich das Ende erreicht? Kann man hinunterfallen? Wenn sich der Ozean bis ans Ende erstreckt, sollte er dann nicht ausfließen, bis alles Wasser verschwunden ist? Wer sich mit solchen Dingen befaßte, mußte begründen können, warum dies nicht eintrat. Vielleicht war die Welt von einem festen Wall aus hohen Bergen eingerahmt und sah damit wie eine Bratpfanne aus, aus der nichts herausfallen konnte? Vielleicht bestand der Himmel, aber auch aus einem Stück fester Materie, das wie eine abgeflachte Halbkugel gewölbt war (was ihrem Aussehen ent-

Krümmung sehr gering und die Kugel damit sehr groß ist. Dies muß schon deshalb der Fall sein, weil es so lange dauert hat, bis man die Erde als Kugel erkannte. Bei einer kleinen Kugel wäre die Krümmung so stark, daß man sie unmöglich übersehen kann. Je geringer die Krümmung der Erdoberfläche ist, desto flacher erscheint auch ein kleines Gebiet auf der Erde.

Aber wie läßt sich der Grad der Erdkrümmung messen? Hier ist eine Möglichkeit: Man nehme einen dünnen Metallstreifen und presse ihn auf einer absolut ebenen Fläche gegen die Erde, so daß er an allen Stellen den Boden berührt. Er muß sich dabei der Wölbung der Erde anpassen. Wenn man diesen Metallstreifen anschließend wieder aufhebt, kann man an ihm entlangschauen und feststellen, wie stark er gekrümmt ist. Ein 1 Kilometer langer Metallstreifen sollte um etwa 12,5 Zentimeter nach innen gebogen sein.

Diese Art von Messung wäre problematisch: Erstens findet man auf der Erde kaum eine Strecke von einem Kilometer, die vollkommen eben ist, und zweitens ist es schwierig, einen Metallstreifen herzustellen, der sich der Wölbung genau anpaßt. Dabei würde man einen Wert erhalten, dem man nie und nimmer trauen könnte. Schon eine kleine Abweichung in der Form des Metallstreifens würde zu einem gewaltigen Fehler bei der Berechnung des Erdumfangs führen. Oder anders ausgedrückt: Manche Experimente, die in der Theorie perfekt funktionieren, gelingen in der Praxis kaum (und dies wäre eines davon). Wir müssen uns somit nach einer anderen Möglichkeit umsehen.

Denken Sie sich nun einen langen, geraden Stab, der genau senkrecht ein Stück weit in die Erde getrieben wird. Wenn die Sonne an einem klaren, wolkenlosen Tag genau darüber steht, wirft der Stab keinen Schatten, weil das Licht ringsum den Boden erreicht. Dann aber wird ein weiterer Stab in einem

spricht) und sich so weit nach unten erstreckte, daß es an allen Seiten die Erde berührte? Damit wäre die Erde ein flacher Teller mit einem Deckel darauf – und auch so würde alles an seinem Platz gehalten. Beide Lösungen schienen brauchbar. Man konnte sich immer noch fragen, wie groß die flache Welt war. In früherster Zeit, als sich die Menschen nur zu Fuß fortbewegten und nicht viel reisten, hielt man die Welt für ziemlich klein und glaubte, daß nur die jeweils eigene Region existierte. Als um 2800 v. Chr. das gesamte Tal des Euphrats und des Tigris von einer gewaltigen Flut überschwemmt wurde, glaubten die dort ansässigen Sumerer deshalb auch, die ganze Welt sei überflutet worden.

Diese naive Vorstellung ist uns in der Bibel als Geschichte von der Sintflut überliefert. Seit die Menschen aber Handel trieben, Armeen in alle Richtungen ausschickten und zu reiten begannen, erweiterte sich der Horizont der Welt. Bis 500 v. Chr. erstreckte sich das persische Reich von Ost nach West über 4800 Kilometer. Westlich davon lagen Griechenland, Italien und weitere Länder, doch ein Ende war nicht in Sicht. Als die griechischen Philosophen erkannt hatten, daß die Erde eine Kugel war, wußten sie zugleich, daß sie eine bestimmte Größe haben mußte; man konnte sie nicht einfach als »sehr groß« bezeichnen oder behaupten, daß sie sich »unendlich« immer weiter erstreckte. Um die Größe der Kugel zu bestimmen, mußte man sich nicht einmal allzu weit von zu Hause entfernen.

Während sich eine flache Erde also unendlich ausdehnen kann, ist eine kugelförmige Erde gewölt, und die Wölbung muß einen ganzen Kreis beschreiben. Um die Größe der Erde zu bestimmen, muß man nur den Grad ihrer Krümmung messen; je stärker die Krümmung ist, desto kleiner ist die Kugel, und je weniger sie gewölbt ist, desto größer ist sie. In einem Punkt kann man sich sicher sein, daß nämlich die

Winkel dazu in den Boden getrieben. Nun fällt das Sonnenlicht auf den Stab und wirft einen Schatten. Wenn man eine Reihe von solchen Stäben hat, die alle zwei Meter aus dem Boden ragen, aber verschieden stark geneigt sind, wirft jeder von ihnen einen unterschiedlich langen Schatten. Je größer der Neigungswinkel ist, desto länger wird der Schatten. Wenn man auf diese Weise die Länge der Schatten im Vergleich zur Länge der Stäbe mißt, läßt sich der Neigungswinkel berechnen, ohne daß man dazu die Neigung messen muß. Der Zweig der Mathematik, der dies ermöglicht, wird als *Trigonometrie* bezeichnet und wurde von den alten Griechen bereits früh entwickelt. Der griechische Philosoph Thales (um 624–546 v. Chr.) soll die Trigonometrie bereits 580 v. Chr. verwendet haben, um die Höhe der ägyptischen Pyramiden aus der Länge der von ihnen geworfenen Schatten zu berechnen.

Sie müssen aber die Stäbe gar nicht selbst neigen. Stellen Sie sich nur zwei genau senkrechte Stäbe vor, die mehrere hundert Kilometer voneinander entfernt stehen. Zwischen diesen beiden Stellen ist die Erde gekrümmt. Wenn man den einen Stab als senkrecht stehend betrachtet, befindet sich der andere in einem Winkel dazu, wobei die Größe des Winkels von der Stärke der Krümmung der Erdoberfläche abhängt. Um 240 v. Chr. bemühte sich der griechische Gelehrte Eratosthenes (um 276–196 v. Chr.), genau diesen Versuch durchzuführen. Er ließ sich sagen, daß die Sonne in der ägyptischen Stadt Syene am 21. Juni mittags genau senkrecht stand, so daß ein ebenfalls senkrecht stehender Stab keinen Schatten warf. In der ägyptischen Stadt Alexandria, wo Eratosthenes lebte, warf ein senkrechter Stab am gleichen Tag dagegen einen kleinen Schatten.

Eratosthenes maß die Länge des Schattens und verglich sie mit der Länge des Stabs; dadurch konnte er bestimmen, wie weit

die Krümmung der Erde den Stab in Alexandria im Verhältnis zu dem Stab in Syene neigte. Die Entfernung zwischen den beiden Städten war ihm bekannt; wenn die Krümmung auf diese Entfernung so stark war, konnte er auch bestimmen, wie weit sie sich erstrecken mußte, um einen Vollkreis zu beschreiben. Er verkündete, die Erdkugel habe einen Umfang von – gerundet und in modernen Maßeinheiten ausgedrückt – 40 000 Kilometern und einen Durchmesser von 12 800 Kilometern. Seine Ergebnisse stimmten ziemlich genau. Erstaunlicherweise wurde diese Entdeckung vor 22 Jahrhunderten gemacht, ohne daß Eratosthenes seine Heimat verlassen hätte – nur durch kluges Nachdenken und eine einfache Messung. Das heißt übrigens nicht, daß Eratosthenes' Ergebnisse voll anerkannt wurden. Andere stellten ähnliche Messungen an und kamen auf niedrigere Ergebnisse. Selbst zur Zeit von Christoph Kolumbus (1451–1506) ging man noch allgemein davon aus, daß der Erdumfang nur etwa 29 000 Kilometer betrage – weniger als drei Viertel des tatsächlichen Umfangs.

Kolumbus segelte 1492 in westlicher Richtung, weil er Asien nur etwa 4800 Kilometer entfernt glaubte. In Wirklichkeit waren es 16 000 Kilometer, und wenn der amerikanische Kontinent nicht gewesen wäre, auf dem er seine Reise beenden konnte, hätte man wahrscheinlich nie wieder etwas von ihm gehört.

Endgültig geklärt wurde diese Frage erst 1522, als auf einer Expedition unter Leitung des portugiesischen Entdeckers Ferdinand Magellan (um 1480–1521) die Welt erstmals vollständig umsegelt wurde. Magellan selbst schaffte es nicht bis zum Ende; denn er wurde unterwegs auf den Philippinen getötet, doch ein Schiff mit 18 Mann an Bord kehrte zurück – und bewies damit, daß die Messung des Eratosthenes gestimmt hatte:

4. Bewegt sich die Erde?

Den meisten Menschen im Altertum wäre dies bestimmt als die dümmste Frage erschienen, die überhaupt denkbar war: Wie konnte man hier Zweifel haben? Man konnte doch sehen, daß sich die Erde *nicht* bewegt. Diese Frage überhaupt zu stellen, mußte als Zeichen von Verücktheit gelten. Warum haben die Menschen dann aber trotzdem gefragt? Ein Grund dafür ist, daß sich alles am Himmel bewegt. Die Sonne geht im Osten auf, wandert über den Himmel und sinkt im Westen wieder. Ebenso der Mond. Die Sterne scheinen sich auf riesigen Kreisbahnen um den Polarstern in der Mitte zu bewegen. Die Bahnen der Sterne, die sich weit ab vom Polaris stern befinden, sind groß genug, um den Horizont zu schneiden; so gehen auch sie im Osten auf und im Westen unter.

Diese Bewegung am Himmel hat die meisten Menschen nicht weiter überrascht. Für sie erschien es ganz natürlich, daß die Erde absolut ruhig und bewegungslos blieb und die Himmelskörper um die Erde kreisten und dabei jeden Tag eine Umdrehung vollführten. So sah es jedenfalls aus, und warum sollte man die Wahnnehmung der Sinne in Zweifel ziehen? Einige Menschen fragten sich aber trotzdem, ob es nicht möglich sei, daß der Himmel still stehe und sich die Erde darunter drehe. Den meisten Menschen erschien diese Alternative jedoch nicht sehr vernünftig. Es war einfach zu offensichtlich, daß sich die riesige Erde nicht bewege.

Aber haben Sie jemals in einem Zug gesessen, während sich ein anderer Zug auf dem Nachbargleis langsam rückwärts in Bewegung setzte? Sie waren vielleicht überrascht. Warum sollte er rückwärts fahren? Sie beobachteten ihn weiter, bis er schließlich so weit zurückfährt, daß die Spitze des anderen Zuges hinter ihrem Fenster verschwindet und – jetzt aufge-

paßt! – sich die ganze Gegend rückwärts bewegt. Sie bemerkten sofort, daß es Ihr Zug war, der sich vorwärts bewegte, während der andere stehenblieb. Solange sich Ihr Zug ganz ruhig bewegte, war kein Unterschied festzustellen; Sie konnten nicht entscheiden, welcher Zug fuhr und welcher stand. Die Menschen der Antike hatten jedoch noch nicht, unsere Möglichkeiten; sie besaßen keine Transportmittel, die sich so gleichmäßig fortbewegten, daß sie nicht entscheiden konnten, ob sie sich vorwärtsbewegten. Ob man nun geht, läuft, sich in einem ungefedereten Wagen über holprige Straßen ziehen läßt oder auf einem trabenden oder galoppierenden Pferd reitet – all diese Arten der Fortbewegung sind so ungleichmäßig, daß sich nie die Frage stellt, ob man sich bewegt oder nicht. Da man der Erde nicht anmerkte, daß sie sich bewegte, schloß man daraus, daß sie sich auch tatsächlich nicht bewegte.

Kehren wir in unserer Vorstellung wieder in unseren Waggon zurück und beobachten wir den Zug neben uns, wie er langsam zurückfährt. Um zu überprüfen, ob er sich bewegt oder wir uns bewegen, müssen Sie nur einmal in die andere Richtung schauen. Ein Blick aus dem Fenster auf der anderen Zugseite würde Sie vermutlich den Bahnhof oder eine Straße erkennen lassen. Wenn diese sich ebenfalls rückwärts bewegen, wüßten Sie, daß Sie selbst fahren und nicht der andere Zug. Im Falle von Himmel und Erde gibt es jedoch keinen neutralen Anhaltspunkt, auf den man schauen könnte. Als erster Mensch behauptete der griechische Philosoph Heraclitus (um 390–322 v. Chr.) nachweislich um 350 v. Chr., daß sich die Erde und nicht der Himmel drehe. Er wurde nicht ernst genommen. Doch 1609 richtete der italienische Wissenschaftler Galileo Galilei (1564–1642) ein sehr primitives Fernrohr gegen den Himmel. Zu seinen Entdeckungen gehörte unter anderem, daß es auf der Sonne dunkle Flecken gab. Als

er sie Tag um Tag beobachtete, bemerkte er, daß sie sich langsam um die Sonne drehen, und schloß daraus, daß die Sonne langsam um eine gedachte Linie (Ihre Achse) rotierte, wobei sie in knapp 27 Tagen eine volle Umdrehung vollführte.

Wenn die Sonne rotierte, dachte er, warum sollte sich dann nicht auch die Erde einmal in 24 Stunden um ihre eigene Achse drehen? Gegen diese Vorstellung gab es immer noch starken Widerstand; 1633 zwang die katholische Kirche Galilei, seine Auffassung öffentlich zu widerrufen und zu behaupten, die Erde bewege sich nicht.

Aber auch das half den Konservativen nicht. 1665 konnte der italienisch-französische Astronom Gian Domenico Cassini (1625–1712) nämlich zeigen, daß sich der Planet Mars innerhalb von $24\frac{1}{2}$ Stunden einmal um seine Achse drehte. 1668 zeigte er, daß der Planet Jupiter alle 10 Stunden einmal um seine Achse rotierte. Danach begannen die Gelehrten zu vermuten, daß sich auch die Erde dreht; sie tat es einfach so gleichmäßig und ruhig, daß es niemand spüren konnte. Doch die Rotation der Erde hing nicht nur von der Tatsache ab, daß sich auch andere Himmelskörper drehen; es waren noch weitere Hinweise vorhanden. Nachdem die Astronomen eine Vorstellung davon bekommen hatten, wie groß das Universum wirklich war (auch wir kommen später noch dazu), wurde es immer unsinniger zu behaupten, die Erde sei starr und das gesamte riesige Universum drehe sich um sie. Allerdings demonstrierte erst 1851 jemand die Erdrotation so, daß man sie tatsächlich sehen konnte. Der französische Physiker Jean B. L. Foucault (1819–1868) ließ ein langes, schweres Pendel von der Decke einer Kirche herabhängen. Es hatte unten eine Spitze, die in den Sand auf dem Kirchenboden eine kleine Furche zog. Das Pendel schwang Strunde um Stunde in der gleichen Ebene, aber die Spur im

Sand auf dem Boden änderte langsam ihre Richtung, während sich die Erde unter dem Pendel drehte. Zum ersten Mal konnten die Zuschauer in der Kirche tatsächlich sehen, wie sich die Erde dreht. Inzwischen hat man freilich Menschen auf den Mond geschossen, von wo man die Drehung der Erde unmittelbar beobachten kann.

5. Warum landet man nicht an einer anderen Stelle, wenn man hochgesprungen ist?

Als die Astronomen im 17. Jahrhundert schließlich darauf beharrten, daß sich die Erde drehe, wurden von den Zweiflern verschiedene Einwände vorgebracht. Wenn sich die Erde drehe, behaupteten sie, dann müsse sich unter jemdem, der senkrecht in die Luft springt, die Erde drehen, so daß er ein kleines Stück von der Stelle entfernt wieder aufkomme, von der er abgesprungen sei. Wenn man einen Ball senkrecht in die Luft werfe, würde dieser noch weiter von der Stelle entfernt wieder auftreffen, von der er hochgeworfen worden sei. Und wenn ein Vogel von seinem Nest wegfliege, würde er nie mehr zurückfinden. Da aber nichts dergleichen eintrat, argumentierten sie, könne sich die Erde auch nicht bewegen.

Diese Einwände *scheinen* vernünftig zu sein. Wenn Sie gerade erst erkannt hätten, daß sich die Erde dreht, würdeten Sie vielleicht nicht, wie man solchen Argumenten etwas entgegensetzt, so daß ein wenig Nachdenken gefordert wäre. Stellen Sie sich vor, Sie säßen in einem Zug direkt neben dem Mittelgang während ein Freund auf der anderen Seite Ihnen gegenüber sitzen würde. Der Zug wartet im Bahnhof, und da Sie nichts weiter zu tun haben, werfen Sie Ihren Freund über den Gang

Wenn wir die Gesetzmäßigkeiten, die den Luftbewegungen und Winden zugrunde liegen, vollständig verstünden, könnten wir das Wetter genau vorhersagen, einschließlich der Hitze- und Kältewellen, der Regenfälle, der Stürme usw. Diese Regeln sind aber so kompliziert, daß die Wettervorhersage bis zum heutigen Tage nicht ganz zuverlässig ist.

Vielleicht werden wir niemals in der Lage sein, das Wetter fehlerfrei vorherzusagen, weil wir auch die Ausgangsbedingungen nie genau genug messen können und selbst minimale Veränderungen dieser Bedingungen sehr unterschiedliche Folgen haben können. Diese Situation ist als *Chaos* bekannt. Langsam wird deutlich, daß immer mehr natürliche Erscheinungen chaotische Eigenschaften haben, die nicht leicht oder überhaupt nicht vorherzusagen sind. Dies verweist auf eine Unzulänglichkeit der Wissenschaft und eine Grenze der menschlichen Erkenntnisfähigkeit, aber wenn es tatsächlich eine Grenze unserer Möglichkeiten gibt, sollten wir sie wenigstens kennen.

Im letzten Kapitel habe ich darauf hingewiesen, daß die Temperaturen in den Tropen höher sind als irgendwo sonst auf der Erde. Der Grund dafür liegt darin, daß die Sonne direkt auf die Tropen herunterbrennt und diese die Sonnenwärme in ihrer konzentriertesten Form empfangen. Weiter nördlich und südlich fällt das Sonnenlicht schräg ein und verteilt sich über ein größeres Gebiet, so daß die Wärme auch weniger konzentriert ist.

Trotzdem wissen die Menschen in den nördlichen Breiten wie beispielsweise in den Vereinigten Staaten oder in Europa, daß es regelmäßig wärmer und kälter wird, ohne daß man deshalb sein Zuhause verlassen muß. Im Juli und August ist es beträchtlich wärmer als im Januar oder Februar. (Auf der südlichen Halbkugel verhält es sich genau umgekehrt.) Die einfachste Erklärung wäre, daß die Sonne im Sommer näher an der Erde ist und deshalb heißer auf uns herniederbrennt – aber das stimmt nicht. Die Sonne spendet das ganze Jahr über ungefähr dasselbe Maß an Wärme.

Worauf es ankommt, ist die Stellung der Sonne am Himmel. Wenn die Sonne immer geradewegs auf den Äquator scheinen würde, dann würde sie auch jeden Mittag über jedem Ort auf dem Äquator senkrecht stehen. An Orten nördlich des Äquators wäre sie mittags stets am südlichen Himmel zu sehen, während man sie an Orten südlich des Äquators immer im Norden sehen würde. Je weiter nördlich man sich befände, desto weiter südlich stünde die Sonne am Mittag, und je weiter südlich man sich befände, desto weiter nördlich stünde sie.

Die von der Sonne beschriebene Bahn folgt jedoch nicht dem Äquator. Die Mittagssonne steht an jedem 20. März senkrecht über dem Äquator; an diesem Tag dauern Nacht und Tag auf der ganzen Erde je zwölf Stunden. Dieses Datum ist als *Frühlingsäquinoktium* oder *Frühlingstagundnachtgleiche* bekannt. (Äquinoktium ist vom lateinischen Wort für »gleiche Nacht« abgeleitet.)

Danach wandert die Mittagssonne jeden Tag weiter nach Norden, bis sie am 21. Juni senkrecht über dem Wendekreis des Krebses steht, der etwas nördlich von Havanna (Kuba) verläuft. Der 21. Juni wird aus diesem Grund als *Sommersonnenwende* bezeichnet.

Von da an bewegt sich die Sonne wieder in südlicher Rich-

tung, bis sie am 23. September (dem *Herbstäquinoktium*) senkt sich über dem Äquator steht. Sie wandert dann weiter nach Süden, bis sie am 21. Dezember senkrecht über dem Wende-kreis des Steinbocks steht, der etwas südlich von Rio de Janeiro (Brasilien) verläuft. Von diesem Tag an (*der Wintersonnenwende*) bewegt sich die Sonne wieder nach Norden und erreicht am 20. März den Äquator. Sie durchläuft jedes Jahr den gleichen Zyklus.

Die Menschen auf der nördlichen Halbkugel können beobachten, wie der Sonnenstand bis zum 21. Juni immer weiter ansteigt und anschließend bis zum 21. Dezember immer weiter absinkt. Je höher die Sonne steht, desto länger ist der Tag, und entsprechend kürzer ist die Nacht. In New York ist es am 21. Juni sechzehn Stunden lang Tag und acht Stunden lang Nacht. Am 21. Dezember ist die Situation genau umgekehrt, wenn die Nacht sechzehn Stunden und der Tag acht Stunden dauert. Die Unterschiede zwischen Tag und Nacht werden größer, je weiter man nach Norden kommt. In der Polargegend gibt es eine Zeit um die Sommersonnenwende, während deren die Sonne – abhängig von der jeweiligen Nähe zum Nordpol – zwischen einem Tag und fast sechs Monaten überhaupt nicht untergeht. Analog dazu gibt es um die Wintersonnenwende eine Phase, in der die Sonne für längere Zeit überhaupt nicht aufgeht.

Auf der Südhalbkugel verläuft alles genau umgekehrt. Wenn die Mittagssonne auf der Nordhalbkugel ansteigt, sinkt sie auf der Südhalbkugel ab, und umgekehrt. Die Sommersonnenwende im Norden entspricht der Wintersonnenwende im Süden usw.

Je höher die Sonne am Himmel steht und je länger sie dort bleibt, desto mehr Wärme spendet sie natürlich, so daß die Nordhalbkugel zur Sommersonnenwende tagsüber mehr Wärme aufnimmt, als sie in der Nacht wieder abgibt. Die große

Hitze herrscht im Juli und August, selbst wenn die Sonne dann schon wieder tiefer steht, weil in diesen beiden Monaten die Wärmeaufnahme weiterhin größer ist als der Verlust an Wärme. Analog dazu wird zur Wintersonnenwende nachts mehr Wärme abgegeben als am Tag aufgenommen; die kälteste Zeit ist also im Januar und Februar. Auf der Südhalbkugel verhält es sich genau umgekehrt; dort sind Juli und August die kältesten, Januar und Februar die heißesten Monate.

In der Urzeit wurde das Untergehen der Sonne mit besonderer Unruhe beobachtet, denn wer nicht die zwingende Notwendigkeit des Auf- und Untergehens der Sonne begriffen hatte, der mußte immer wieder fürchten, daß die Sonne diesmal ständig weitersinken und schließlich für immer verschwinden würde. Aus diesem Grund war das Eintreten der Wintersonnenwende, wenn die Sonne wieder nordwärts wanderte, eine Zeit der Erleichterung und ausgelassener Feiern. Mit den Tagen um Weihnachten und Neujahr haben wir noch heute einen Nachfolger dieser Feier.

8. Wie mißt man die Zeit?

Wenn man – wie wir es gerade getan haben – die Jahreszeiten betrachtet, ergibt sich naturgemäß die Frage, wie man die Zeit mißt.

Einige Aspekte der Zeit sind psychologischer und physiologischer Natur. So scheint die Zeit langsamer zu vergehen, wenn wir krank sind, als wenn wir gesund sind, langsamer, wenn wir Schmerzen haben, als wenn wir schmerzfrei sind, langsamer, wenn wir Trauer oder Langeweile empfinden, als wenn wir fröhlich oder mit etwas beschäftigt sind, und auch langsamer,

Leuchter unabhängig vom Umfang des Bogens in einer immer gleich langen Zeitspanne vor und zurück. Er untersuchte dies anhand seines Pulsschlags (was nicht als verlässlicher Zeitmesser gewertet werden kann, weil seine Geschwindigkeit vom Gemütszustand und von der körperlichen Aktivität abhängt). Zu Hause angekommen, stellte er Versuche an, indem er Schnüre mit Gewichten behangte und in kleinen und größeren Bogen schwingen ließ. Auf diese Weise entdeckte er das Prinzip des *Pendels* (nach dem lateinischen Wort für »hängen« oder »schwingen«).

Das Pendel führt eine Bewegung aus, die prinzipiell dazu verwendet werden kann, um das Getriebe einer Uhr mit großer Gleichmäßigkeit in Gang zu halten. Seine beiden Mängel sind aber, daß es im Schwung gehalten werden muß und daß sein Takt nicht vollkommen regelmäßig ist.

1656 ließ der holländische Physiker Christiaan Huygens (1629–1695) ein Pendel zwischen zwei gebogenen Metallstreifen schwingen, die dafür sorgten, daß es sich auf einer Kurve bewegte, die als *Zykloide* bezeichnet wird; die Schwingungsdauer dabei war konstant. Darüber hinaus entwickelte er Methoden, wie man Gewichte einsetzen konnte, um dem Pendel genau so viel Schub mitzugeben, daß es unendlich lang schwang.

Huygens' *Pendeluhr* war der erste Zeitmesser, der für wissenschaftliche Zwecke genau genug war. Sie maß die Zeit auf ein Sechzigstel einer Stunde – d. h. auf die Minute – genau, und erstmals konnte man eine Uhr mit zwei Zeigern versehen. Jedesmal, wenn der Minutenzeiger eine volle Umdrehung ausgeführt hatte, rückte der Stundenzweiger um eine Stunde vor. Seitdem hat man auch Uhren konstruiert, die die Zeit auf ein Sechzigstel einer Minute – eine Sekunde – genau messen; mit dem Sekundenzeiger wurden sie um einen dritten Zeiger ergänzt. Heutzutage können selbst winzige Sekundenbruchteile exakt gemessen werden.

10. Wie alt ist die Erde?

Da wir uns gerade mit der Zeitmessung befaßt haben, stellen wir nun eine Frage, die ebenfalls mit der Zeit zu tun hat. Wie alt ist die Erde?

Wir wissen ziemlich sicher, daß die Erde seit mindestens 5000 Jahren existiert, denn einige schriftliche Zeugnisse lassen sich auf 3000 v. Chr. datieren, als die Sumerier die Schrift erfanden. Einige Artefakte, d. h. von Menschenhand gemachte Gegenstände wie Töpferwaren oder kleine Figuren, stammen aus noch früherer Zeit. Bis fast 1800 glaubte man in unserer abendländischen Tradition nahezu ausnahmslos, daß die Erde ungefähr 6000 Jahre alt sei. Zu diesem Ergebnis kamen die Anhänger einer solchen Auffassung ausschließlich aufgrund ihrer Interpretation der Bibel, die sie als göttliche Wahrheit akzeptierten, aber dies war eine Sache des Glaubens und kein wissenschaftlicher Beweis. Natürlich gab es ein paar wenige, die nach Indizien suchten und zu ganz anderen Schlußfolgerungen gelangten, als die Bibel sie anzubieten hatte. Diese Gelehrten glaubten, daß die Naturgewalten – Regen, Wind und das Schlaggen der Wellen – das Aussehen der Erde langsam veränderten. Sie gingen davon aus, daß solche Kräfte viel von der heutigen Gestalt der Erde erklären könnten, aber nur, wenn sie die Möglichkeit hatten, lange einzuwirken – viel länger als 6000 Jahre. Einer, der dies schon um 1570 glaubte, war der französische Gelehrte Bernard Palissy (um 1510–1589).

Wer ein Erdalter von 6000 Jahren akzeptierte, bestritt zwar nicht, daß es eine Veränderung gab, schrieb sie aber ausschließlich der Legende von der Sintflut zu. Palissy wollte nicht glauben, daß eine solche weltweite Flut stattgefunden haben könnte, und vertrat die Auffassung, das Erscheinungs-

bild der Erde gehe auf langsame Veränderungen zurück, die sich über lange Zeiträume erstreckten. 1589 wurde er auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Es war eine schlechte Zeit für Leute, die selbstständig dachten.

Noch 1681 verfaßte der englische Geistliche Thomas Burnet (um 1635–1715) ein Werk, das die Geschichte von der Sintflut unterstützte, doch 1692 schrieb er ein anderes Buch, in dem er die Geschichte von Adam und Eva in Frage stellte. Dies war das Ende seiner Karriere.

1749 begann der französische Naturforscher Georges Louis de Buffon (1707–1788) damit, eine umfangreiche Enzyklopädie zu verfassen, in der er die Welt auf naturwissenschaftliche Weise erklären wollte. Er schätzte, daß die Erde zum Ereichen ihres jetzigen Zustands mindestens 75 000 Jahre alt sein mußte. Dadurch geriet er in Schwierigkeiten und wurde ähnlich wie Galilei zum Wideruf gezwungen.

Doch letzten Endes kann nichts die Menschen vom Nachdenken abhalten. Der Wendepunkt kam 1795, als der schottische Geologe James Hutton (1726–1797) ein Buch mit dem Titel *The Theory of the Earth* (Die Theorie der Erde) verfaßte, in dem er sorgfältig alle Indizien sammelte, die für die Theorie sprachen, daß sich allmähliche Veränderungen über einen langen Zeitraum hinziehen. Während des nächsten halben Jahrhunderts akzeptierten immer mehr Wissenschaftler Huttons Vorstellung eines langsamens, stetigen Wandels, die zur Grundlage des Aktualismus wurde. Diese Theorie leugnet jedoch nicht das gelegentliche Auftreten katastrophaler Ereignisse wie beispielsweise gigantischer Vulkanausbrüche. Die Wissenschaftler begannen daraufhin sich zu überlegen, welche Veränderungen auf der Erde in der Jetzzeit stattfinden, und zu berechnen, wie schnell diese abließen. Wenn man davon ausging, daß sie immer mit der gleichen Geschwindigkeit vor sich gingen, konnte man abschätzen, wie lange sie

schon im Gange gewesen sein mußten, damit sich die Erde in ihrem jetzigen Zustand befand.

Der erste, der dies versuchte, war Edmund Halley, der auch als erster herausgefunden hatte, wann die Winde wehen. 1715 befaßte er sich mit dem Salzgehalt des Meeres und folgerte, daß Salz sei von den Flüssen dorthin transportiert worden, die kleine Mengen Salz aus dem Boden des Landes lösten, das sie durchflossen. Außerdem entdeckte er, daß durch die Einwirkung der Sonnenwärme zwar Wasser, nicht aber Salz aus dem Meer verdunsten kann; deshalb bestehe jeder Regen aus Süßwasser, das dem Ozean noch mehr Salz bringe, wenn es die Flüsse speist und ins Meer zurückkehrt. Wenn man davon ausgeht, daß der Ozean ursprünglich aus Süßwasser bestand, und dann berechnet, wieviel Salz ihm die Flüsse jedes Jahr zuführen, kann man bestimmen, wie lange es gedauert haben muß, bis der Ozean so salzhaltig war, wie er heute ist. Diese Schlußfolgerung klingt gut, birgt aber einige Fehlerquellen. Zunächst einmal bestand der Ozean ursprünglich vielleicht nicht aus Süßwasser, sondern enthielt von Anfang an etwas Salz. Außerdem war die Gesamtmenge an Salz, die jedes Jahr über die Flüsse in den Ozean gelangte, nun wirklich nicht bekannt; zu Halleys Zeit wußte man praktisch nichts über die Flüsse außerhalb Europas. Ferner gab es die Möglichkeit, daß die gesamte Salzmenge, die gerade in den Ozean geschwemmt wurde, höher oder niedriger lag als in früheren Zeiten. Ganz zu schweigen von der Tatsache, daß einige Vorgänge dem Meer auch Salz entziehen. Dazu gehört nicht die gewöhnliche Verdunstung, manchmal jedoch werden seichte Meeresarme abgetrennt und trocknen aus, so daß ausgedehnte Gebiete zurückbleiben, die zu Salzstöcken werden.

Halley versuchte solche Unregelmäßigkeiten einzubeziehen und kam zu dem Schluß, daß die Erde ungefähr eine Milliarde

Jahre alt sein müsse, damit die Meere so salzig werden könnten. Diese Zahl erschien so unvorstellbar hoch, daß sie damals niemand ernst nehmen konnte. Sie lag mehr als 13 000 mal so hoch wie Buffons Schätzung ein knappes Dreivierteljahrhundert später, aber die Zustände in Großbritannien waren damals schon besser, weshalb Halley auch nicht in Schwierigkeiten geriet.

Ein anderes Verfahren zur Schätzung des Erdalters beruhte auf der Geschwindigkeit von Ablagerungen. Die Flüsse, Seen und Ozeane der Welt lagen Schlamm und Schllick ab, die zu Boden sinken und als *Sediment* bezeichneten werden (nach dem lateinischen Wort für »Bodensatz«). Wenn zusätzliches Sediment abgelagert wird, verdichtet das Gewicht der oberen Schichten die unteren Schichten zu *Sedimentgestein*. Man konnte abschätzen, wie schnell die Sedimentbildung in der Jetzeit vor sich ging. Wenn man annahm, daß dieser Prozeß stets mit der gleichen Geschwindigkeit abgelaufen war, konnte man berechnen, wie lange es gedauert hatte, bis die Stärke des in der Erde vorgefundenen Sedimentgesteins erreicht war. Die Ergebnisse ließen darauf schließen, daß die Erde mindestens eine halbe Milliarde Jahre alt sein mußte.

Diese Schätzungen waren mehr als grob: Sie waren bedeutsam, doch es fehlte ihnen an Überzeugungskraft. Was man brauchte, war eine Veränderung, die völlig gleichmäßig vor sich ging, die von Anfang an stattgefunden hatte und die leicht messbar war. Niemand konnte sich zur Zeit Halleys oder Huttons vorstellen, wie eine solche Veränderung ausssehen möchte, und als sie ein Jahrhundert nach Hutton schließlich auf der Bildfläche erschien, wurde sie durch reinen Zufall entdeckt.

11. Wie wurde das Alter der Erde schließlich bestimmt?

Im Jahre 1896 entdeckte der französische Physiker Antoine Henri Becquerel (1852–1908) ganz zufällig (er suchte nach etwas anderem), daß eine bestimmte Substanz, die Atome des Metalls Uran enthielt, eine bis dahin unbekannte Strahlung abgab. Die polnisch-französische Chemikerin Marie Skłodowska Curie (1867–1934) untersuchte die Erscheinung genauer und folgte 1908, die neue Strahlung sei das Ergebnis von *Radioaktivität*: Uran und ein anderes Element, Thorium (das dem Uran ähnlich ist), waren beide radioaktiv. Der britische Chemiker Frederick Soddy (1877–1956) gehörte zu den Wissenschaftlern, die 1914 zeigten, daß Uran- und Thoriumatome aufgrund ihrer Radioaktivität zu immer einfacheren Atomen zerfielen, bis am Ende der sogenannten *Zerfallsreihe* schließlich Bleiatome entstanden. Diese Bleiatome waren nicht radioaktiv, so daß der Zerfallsprozeß schließlich zum Stillstand kam.

Zusammen mit Soddy arbeitete der Neuseeländer Ernest Rutherford (1871–1937). Er zeigte, daß jedes Element eine sogenannte *Halbwertszeit* hatte. Mit anderen Worten: Eine bestimmte Menge eines radioaktiven Elements verliert in einer bestimmten, für das Element charakteristischen Zeitspanne durch Zerfall zunächst die Hälfte seiner Atome, daraufhin in einem gleich langen Zeitraum die Hälfte der übrigen Atome und so weiter. Das bedeutet, daß man genau vorhersagen konnte, wieviel von einer bestimmten Menge Uran oder Thorium nach einer bestimmten Anzahl von Jahren noch übrig sein würde.

Es stellte sich heraus, daß sowohl Uran als auch Thorium nur sehr langsam zerfielen. Die Halbwertszeit von Uran belief

sich auf 4,5 Milliarden Jahre, die von Thorium gar auf 14 Milliarden Jahre. Diese langen Halbwertszeiten zeigten, warum Uran und Thorium immer noch in der Erdkruste vorhanden waren, selbst wenn Halley und andere recht hatten und die Erde eine Milliarde Jahre alt war. Damit wurde der Erde auch eine obere Altersgrenze gesetzt: Wäre sie eine Billion Jahre alt, so wäre der Großteil ihres Urans oder Thoriums bereits zerfallen.

1907, noch bevor das Problem des radioaktiven Zerfalls restlos geklärt war, vertrat der amerikanische Physiker Bertram Borden Boltwood (1870–1927) die Auffassung, daß in uranhaltigem Gestein der Urananteil langsam zerfiele und mit einer bestimmten Geschwindigkeit Blei produziere. Aus der entstehenden Menge an Blei könne man dann berechnen, wie lange der Stein schon überführt in dieser Form dagelegen habe.

Ganz so einfach war es aber nicht, denn in dem Gestein konnte schon von Anfang an etwas Blei gewesen sein. Doch Blei existiert in vier verschiedenen, eng verwandten Spieldingen, den sogenannten *Isotopen*, die in der Natur in einem ganz bestimmten Verhältnis vorkommen. Eines der Isotope entsteht *nicht* durch radioaktiven Zerfall. Wenn man also misst, wieviel davon in dem Gestein enthalten ist, kann man berechnen, wieviel von allen vier Isotopen ursprünglich in dem Gestein vorkam. Somit spielt für die Altersbestimmung des Gesteins nur das zusätzlich zu dieser Menge vorhandene Blei eine Rolle.

Es war nicht schwierig, Steine zu finden, die 1 Milliarde Jahre alt waren – was Halley's ursprüngliche Schätzung nun nicht mehr lächerlich klingen ließ. 1931 wurden Steine entdeckt, die 2 Milliarden Jahre alt waren. Die ältesten bisher entdeckten Gesteine, auf die man in Westgrönland stieß, sind sogar 3,8 Milliarden Jahre alt.

Aber dies gibt uns nur das Alter der ältesten Steine an, die auf der Erde zu finden sind. Unser Planet selbst könnte älter sein, denn vielleicht sind die meisten Gesteine vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren durch vulkanische Tätigkeit immer wieder eingeschmolzen worden, so daß keines in unverändert fester Form aus dieser Zeit überdauert hat. Die Wissenschaftler konnten dieses Problem auf eine Weise lösen, die ich später noch erklären werde; heute geht man jedenfalls allgemein davon aus, daß die Erde 4,6 Milliarden Jahre alt ist.

12. Was ist Masse?

Um mehr über die Erde herauszufinden, ist es zweckmäßig, sich über die Bedeutung des Begriffs *Masse* zu verständigen; doch bevor wir dies tun können, müssen wir uns zunächst überlegen, was *Gewicht* bedeutet.

Gewicht ist das Ergebnis der Anziehungskraft der Erde auf einen bestimmten Gegenstand. Einige Dinge werden mit solcher Kraft angezogen, daß es Mühe bereitet, sie gegen die Wirkung der Gravitation hochzuheben; solche Objekte sind schwer. Andere Dinge werden mit weniger Kraft angezogen, so daß man sie mit geringer Mühe hochheben kann und die deshalb leicht sind. Das Gewicht solcher Gegenstände mißt man in *Kilogramm*.

Nach Newtons Gravitationsgesetz verändert sich die Anziehungs- kraft der Erde jedoch mit der Entfernung. Sie verhält sich so, als sei sie im Mittelpunkt der Erde konzentriert, während wir uns 6350 Kilometer davon entfernt auf der Oberfläche befinden. Wir sind uns meist nicht bewußt, daß sich der Einfluß der Schwerkraft verändert; schließlich blei-

sich auf 4,5 Milliarden Jahre, die von Thorium gar auf 14 Milliarden Jahre. Diese langen Halbwertszeiten zeigten, warum Uran und Thorium immer noch in der Erdkruste vorhanden waren, selbst wenn Halley und andere recht hatten und die Erde eine Milliarde Jahre alt war. Damit wurde der Erde auch eine obere Altersgrenze gesetzt: Wäre sie eine Billion Jahre alt, so wäre der Großteil ihres Urans oder Thoriums bereits zerfallen.

1907, noch bevor das Problem des radioaktiven Zerfalls restlos geklärt war, vertrat der amerikanische Physiker Bertram Boltwood (1870–1927) die Auffassung, daß in uranhaltigem Gestein der Urananteil langsam zerfiele und mit einer bestimmten Geschwindigkeit Blei produziere. Aus der entstehenden Menge an Blei könne man dann berechnen, wie lange der Stein schon unberührt in dieser Form dagelegen habe.

Ganz so einfach war es aber nicht, denn in dem Gestein konnte schon von Anfang an etwas Blei gewesen sein. Doch Blei existiert in vier verschiedenen, eng verwandten Spielarten, den sogenannten *Isotopen*, die in der Natur in einem ganz bestimmten Verhältnis vorkommen. Eines der Isotope entsteht *nicht* durch radioaktiven Zerfall. Wenn man also mißt, wieviel davon in dem Gestein enthalten ist, kann man berechnen, wieviel von allen vier Isotopen ursprünglich in dem Gestein vorkam. Somit spielt für die Altersbestimmung des Gesteins nur das zusätzlich zu dieser Menge vorhandene Blei eine Rolle.

Aber dies gibt uns nur das Alter der ältesten Steine an, die auf der Erde zu finden sind. Unser Planet selbst könnte älter sein, denn vielleicht sind die meisten Gesteine vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren durch vulkanische Tätigkeit immer wieder eingeschmolzen worden, so daß keines in unverändert fester Form aus dieser Zeit überdauert hat. Die Wissenschaftler konnten dieses Problem auf eine Weise lösen, die ich später noch erklären werde; heute geht man jedenfalls allgemein davon aus, daß die Erde 4,6 Milliarden Jahre alt ist.

12. Was ist Masse?

Ganz so einfach war es aber nicht, denn in dem Gestein existiert in vier verschiedenen, eng verwandten Spielarten, den sogenannten *Isotopen*, die in der Natur in einem ganz bestimmten Verhältnis vorkommen. Eines der Isotope entsteht *nicht* durch radioaktiven Zerfall. Wenn man also mißt, wieviel davon in dem Gestein enthalten ist, kann man berechnen, wieviel von allen vier Isotopen ursprünglich in dem Gestein vorkam. Somit spielt für die Altersbestimmung des Gesteins nur das zusätzlich zu dieser Menge vorhandene Blei eine Rolle.

Es war nicht schwierig, Steine zu finden, die 1 Milliarde Jahre alt waren – was Halleys ursprüngliche Schätzung nun nicht mehr lächerlich klingen ließ. 1931 wurden Steine entdeckt, die 2 Milliarden Jahre alt waren. Die ältesten bisher entdeckten Gesteine, auf die man in Westgrönland stieß, sind sogar 3,8 Milliarden Jahre alt.

Um mehr über die Erde herauszufinden, ist es zweckmäßig, sich über die Bedeutung des Begriffs *Masse* zu verstündigen; doch bevor wir dies tun können, müssen wir uns zunächst überlegen, was *Gewicht* bedeutet.

Gewicht ist das Ergebnis der Anziehungskraft der Erde auf einen bestimmten Gegenstand. Einige Dinge werden mit solcher Kraft angezogen, daß es Mühe bereitet, sie gegen die Wirkung der Gravitation hochzuheben; solche Objekte sind schwer. Andere Dinge werden mit weniger Kraft angezogen, so daß man sie mit geringer Mühe hochheben kann und die deshalb leicht sind. Das Gewicht solcher Gegenstände mißt man in *Kilogramm*.

Nach Newtons Gravitationsgesetz verändert sich die Anziehungskraft der Erde jedoch mit der Entfernung. Sie verhält sich so, als sei sie im Mittelpunkt der Erde konzentriert, während wir uns 6350 Kilometer davon entfernt auf der Oberfläche befinden. Wir sind uns meist nicht bewußt, daß sich der Einfluß der Schwerkraft verändert; schließlich blei-

ben wir immer in ungefähr der gleichen Entfernung vom Erdmittelpunkt. Es macht selbst dann keinen großen Unterschied, wenn wir auf den Gipfel des höchsten Berges klettern oder in die Tiefe des Meeres hinabtauchen. Deshalb halten wir das Gewicht in der Regel für eine unveränderliche Kraft. Wenn wir uns aber auf eine Höhe von 6350 Kilometern über der Erde begeben würden, wären wir doppelt so weit vom Erdmittelpunkt entfernt, und der Einfluß der Schwerkraft wäre um 2×2 , d. h. 4mal geringer. Wenn wir auf einer Leiter so weit nach oben steigen könnten, würden wir dort nur ein Viertel so viel wiegen wie auf der Erdoberfläche, und noch weiter oben sogar noch weniger.

Isaac Newton, der 1687 die Bewegungssätze aufgestellt hatte, war auf der Suche nach einer Maßeinheit wie Gewicht, die aber von der Schwerkraft unabhängig war und sich damit nicht mit der Entfernung von der Erde veränderte. Wenn ein Gegenstand schwerer ist als ein anderer, dann deshalb, weil er stärker von der Erde angezogen wird. Aber gibt es noch eine andere Möglichkeit, diesen Unterschied zu messen? Newton vertrat die Ansicht, daß die Geschwindigkeit oder die Richtung eines Objekts nur durch die Anwendung einer Kraft verändert werden kann und daß ein schweres Objekt eine größere Kraft erfordert als ein leichtes.

Dies entspricht tatsächlich unserer alltäglichen Erfahrung. Stellen Sie sich auf dem Boden einen Ball vor, den Sie in Bewegung setzen möchten. Das ist nicht schwierig, schon ein Stoß mit dem Finger wird ausreichen. Und wenn der Ball einmal rollt, genügt ein weiterer Stoß, um den Ball zu stoppen oder seine Richtung zu ändern. Stellen Sie sich nun aber eine eiserne Kanonenkugel von der gleichen Größe vor, die auf dem Boden liegt. Sie ist viel schwerer als der Ball; wenn Sie diese in Bewegung setzen möchten, werden Sie feststellen, daß es dazu einer viel größeren Anstrengung bedarf. Und

wenn sie sich einmal bewegt, werden Sie auch viel mehr Kraft aufwenden müssen, um ihre Richtung zu ändern oder sie aufzuhalten.

Der Widerstand eines Objekts gegen Änderungen seiner Bewegung wird *Trägheit* genannt; das Maß an Trägheit eines Objekts bezeichnet man als *Masse*. Die Masse verändert sich nicht mit der Stärke oder Schwäche eines Gravitationsfeldes, so daß die Wissenschaftler lieber mit Masse als mit Gewicht arbeiten. Sie sprechen eher davon, ein Objekt habe eine größere oder geringere Masse, als zu sagen, es sei schwerer oder leichter.

Wie das Gewicht wird auch die Masse in Kilogramm angegeben (was eigentlich ein Fehler ist, aber die Wissenschaftler bleiben bei ihrer Gewohnheit). Sie läßt sich auf zweierlei Weise messen: durch die Bestimmung des Gewichts, sofern man die Stärke des vorhandenen Gravitationsfeldes mit einbezieht, oder durch die Bestimmung der Trägheit, wobei das Gravitationsfeld keine Rolle spielt. Die beiden Methoden scheinen nichts miteinander zu tun zu haben, aber sie kommen immer zum gleichen Ergebnis, so daß die schwere und träge Masse identisch sind – was die Wissenschaftler verwundern.

13. Wie hoch ist die Masse der Erde?

Die Frage nach der Masse der Erde wirft in der Tat ein Problem auf. Wir können die träge Masse der Erde nicht messen, weil diese so massereich ist, daß sich keine Kraft erzeugen läßt, die stark genug wären, um ihre Bewegung spürbar zu ändern. Hinzut kommt, daß man auch die schwere Masse der Erde nicht messen kann, weil man diese nicht

wiegen kann. Aber man muß die Erde auch gar nicht wiegen. Wenn man einen gewöhnlichen Gegenstand nimmt und in einem bestimmten Abstand seine Anziehungs kraft mißt, kann man diese mit der Anziehungs kraft vergleichen, die die Erde bei ihrer viel größeren Entfernung zwischen Mittelpunkt und Oberfläche erzeugt. Wenn die Masse dieses Gegenstands bekannt ist, läßt sich auch die Masse der Erde berechnen.

Leider ist die Gravitation aber eine so unglaublich schwache Kraft, daß sie nur bei einem riesigen Objekt spürbar ist. Es scheint, daß sie rohbringend sein kann, tun dies aber nur deshalb, weil wir sie mit der gewaltigen Erde verbinden. Ein gewöhnlicher Gegenstand wie etwa ein Eisenklumpen erzeugt eine so schwache Anziehungs kraft, daß sie nicht messbar ist. Zum mindesten scheint es so zu sein.

Der britische Wissenschaftler Henry Cavendish (1731–1810) befaßte sich 1798 mit diesem Problem. Er hängte einen leichten Stab auf, der in der Mitte an einem Draht befestigt war, und versah beide Stabenden mit einer kleinen Bleikugel. Der Stab konnte sich so frei um den Draht drehen, daß nur eine sehr geringe Kraft auf die Kugeln zu wirken brauchte, um die Vorrichtung in Bewegung zu setzen. Auf diese Weise konnte Cavendish messen, wie stark die Drehung war, die von verschiedenen kleinen Kräften bewirkt wurde.

Anschließend brachte er zwei große Metallkugeln in die Nähe der beiden kleinen Kugeln, auf jeder Seite eine. Die Schwerkraft zwischen den großen und den kleinen Kugeln verdrehte den Draht leicht, und aus dem Grad der Drehung errechnete Cavendish die Schwerkraft zwischen den beiden Kugelpaaren. Er kannte den Abstand dazwischen, von Mittelpunkt zu Mittelpunkt, und die jeweilige Masse. Außerdem kannte er

den Wert der viel größeren Kraft, die von der Erde – über die Entfernung zwischen Erdmittelpunkt und Erdoberfläche hinweg – auf dieselben leichten Kugeln einwirkte. Aus dem Unterschied in der Stärke der Anziehungs kraft konnte er die Masse der Erde berechnen.

Er kam zu dem Schluß, daß die Masse der Erde 6×10^{24} Kilogramm entsprach. (Das sind 6 Millionen Milliarden Milliarden oder Quadrillionen Kilogramm.) Da wir dies auch heute noch für den ungefähr richtigen Wert halten, war Cavendish für einen ersten Versuch sehr erfolgreich.

14. Was ist Dichte?

Es könnte den Anschein haben, als sei ein großes Objekt automatisch schwerer als ein kleines, aber aus Erfahrung wissen wir, daß das nicht stimmt. Ein großer Gegenstand aus Kork kann leichter sein als ein kleinerer Gegenstand aus Blei; bei einigen Stoffen scheint einfach mehr Masse in einem bestimmten Rauminhalt gepackt zu sein als bei anderen. Die Größe der Masse in einem bestimmten Volumen bestimmt seine Dichte; man kann also sagen, daß bestimmte Gegenstände dichter sind als andere.

Ein Wasserwürfel von 1 Zentimeter Kantenlänge (1 Kubikzentimeter) wiegt genau 1 Gramm. (Das ist kein Zufall; die Werte dieser beiden Einheiten wurden mit Absicht so gewählt.) Wenn wir die Masse eines Gegenstandes in Gramm und sein Volumen in Kubikzentimetern kennen, können wir die Masse durch das Volumen dividieren und erhalten eine Zahl für die Dichte, also z. B. 1g/cm^3 für Wasser.

Die alten Griechen entdeckten, wie man den Rauminhalt

(nach Saturn). Die anderen vier Tage sind nach nordischen Göttern benannt. Im Französischen sind die anderen vier Tage dagegen *mardi* (Mars), *mercredi* (Merkur), *vendredi* (Jupiter) und *samedi* (Venus). Die Juden übernahmen die babylonische Woche und versuchten, ihr in den ersten zwei Kapiteln des Buches Genesis ein religiöses Gepräge zu geben; die Namen verweisen aber noch auf ihren heidnischen Ursprung. Da die sieben Planeten frei über den Himmel ziehen und sich nicht an seinem festen Gewölbe fixieren lassen, folgerten die alten Griechen, jeder der sieben Planeten müsse an einer eigenen Kugel befestigt sein, die sich zwischen dem Himmel (der äußersten Kugel mit den Sternen) und der Erde drehe. Da diese inneren Sphären nicht sichtbar waren, nahm man an, sie seien vollkommen durchsichtig, und bezeichnete sie (nach dem griechischen Wort für »durchsichtig«) als *kratalline Sphären*. Im Altertum lautete die Antwort auf die Frage, ob sich der Himmel in einem Stück drehe: Ja, aber mit ganz wenigen Ausnahmen. Wie wir beizeiten aber noch sehen werden, lagen sie damit völlig falsch.

Sternbilder bei jedem neuen Sonnenaufgang ein wenig nach Westen verschieben. Die einfachste Möglichkeit, dieses Phänomen zu erklären, ist die Annahme, daß sich die Sonne wie der Mond von West nach Ost gegen die Sterne verschiebt und in 365½ Tagen einen kompletten Kreis um den Himmel beschreibt.

Die Sonne und der Mond sind besondere Himmelskörper; sie sehen nicht aus wie die anderen Objekte am Himmel, sondern sind eher leuchtende Scheiben als Lichtpunkte. Es gibt jedoch fünf Objekte, die zwar wie (ungewöhnlich helle) Sterne aussehen, aber ihre Position gegenüber den übrigen Sternen verändern. Diese fünf Himmelskörper wurden erstmals um 3000 v. Chr. von den alten Sumerern studiert; sie erschienen so ungewöhnlich, daß sie die Namen von Göttern erhielten. Dieser Brauch hielt sich und wurde zuerst von den Griechen, dann von den Römern übernommen. Wir benutzen die römischen Götternamen noch immer und nennen diese fünf sternartigen Objekte Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Zusammen mit der Sonne und dem Mond stellen sie die Wandelsterne dar und wurden (nach dem griechischen Wort für »umherziehen«) als *Planeten* bezeichnet. (Heute gelten Sonne und Mond nicht mehr als Planeten; den Grund hierfür werde ich später noch erklären.)

Die sieben Planeten haben die Menschen schon immer gefestigt, weil ihre Bahnen von schlichten Gemütern als eine Art Code mit göttlichen Botschaften über die Zukunft angesehen wurden (was von skrupellosen Astrologen ausgenutzt wird, die gegen Geld wertlose Mitteilungen erstellen). Die Sieben-tagewoche wurde von den Babylonionern eingeführt, um an die sieben Planeten zu erinnern, und bis zum heutigen Tage sind in vielen europäischen Sprachen die Wochentage nach den einzelnen Planeten benannt. Im Englischen gibt es *sunday* (nach der Sonne), *monday* (nach dem Mond) und *saturday* (nach der Erde).

27. Ist die Erde der Mittelpunkt des Universums?

Dies ist eine weitere Frage, die manch einem unsinnig erscheint. Für die Menschen des Altertums und des Mittelalters verstand es sich von selbst, daß die Erde der Mittelpunkt des Universums war. Schließlich bestand nach ihrem Verständnis die gesamte Welt nur aus der Erde und dem Himmel. Es schien, als sei der Himmel schon immer über uns gewesen, überall im gleichen Abstand, und wölbe sich über die Erde,

wie sich deren Oberfläche krümmte. Der Himmel schloß die Erde ein, die sich im Zentrum befand. Wo also lag das Problem?

Der einzige Unsicherheitsfaktor waren die Planeten. Wo genau befinden sie sich zwischen Himmel und Erde? Da sie mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf ihren Bahnen ziehen, gelangten die Griechen zu folgender Annahme: Je schneller sich ein Planet gegen den Hintergrund der Sterne zu bewegen scheint, desto näher muß er an der Erde sein. Das entspricht auch der allgemeinen Erfahrung: Bei einem Pferderennen wirken die Pferde auf der Gegengerade der Rennbahn relativ langsam, aber wenn sie direkt an uns vorbeigaloppieren, sahen sie scheinbar schnell wie der Wind vorüber. Der gleiche Effekt läßt sich bei einem Autorennen beobachten. Ebenso scheint ein niedrig fliegendes Düsenflugzeug schnell vorzukommen, auch wenn dasselbe Flugzeug sehr langsam fliegt.

Ausgehend von der Geschwindigkeit der Bewegung nahmen die Griechen also an, daß von allen Planeten der Mond der Erde am nächsten sei. Danach folgten – in dieser Reihenfolge – Merkur, Venus, die Sonne, Mars, Jupiter und Saturn. Jeder von ihnen hatte seine eigene kristalline Sphäre, so daß es insgesamt sieben waren; dahinter gab es eine achte, an der die Fixsterne befestigt waren.

Dies war zwar ein sehr hübsches Bild, konnte das Problem mit den Planeten aber nicht völlig lösen. Die Menschen im Altertum mußten die genauen Bahn der Planeten kennen, wenn die Astrologie funktionieren sollte. Die Astrologen (von denen im Altertum die meisten auch hinter ihren Überzeugungen standen) mußten diese Bahnen sehr sorgfältig untersuchen und begründeten dabei die wirkliche Wissenschaft von den Sternen, die *Astronomie*.

Selbst in vorgeschichtlicher Zeit studierten die Menschen den Himmel genau. So war das heute als Stonehenge bekannte steinerne Bauwerk im Südwesten Englands, das um 1500 v. Chr. errichtet wurde, möglicherweise ein Hilfsmittel, um die zukünftige Bahn der Sonne und des Mondes zu bestimmen. Die Sterne bewegen sich kontinuierlich und gleichmäßig. Wenn dies auch auf die Planeten zuträfe, wäre es kein Problem, ihre künftige Position herauszufinden (und es gäbe keine Astrologie, denn der durch ihre Bahn dargestellte Code wäre zu einfach, um sich darüber Gedanken zu machen). Aber die Planeten bewegen sich nicht kontinuierlich und gleichmäßig. Der Mond zieht die eine Hälfte seiner Himmelsbahn etwas langsamer als die andere Hälfte, und das gleiche gilt, wenn auch in geringem Maße, für die Sonne. Mit den anderen Planeten verhält es sich noch komplizierter. Im allgemeinen wandern sie gegenüber den Fixsternen von West nach Ost (was als *Rechtsläufigkeit* bezeichnet wird). Doch immer wieder einmal stockt ihre Bewegung, und ihre Richtung kehrt sich dann tatsächlich um, von Ost nach West (was als *Rückläufigkeit* bezeichnet wird), bevor sie sich wieder rechtsläufig bewegen. Jeder Planet hat seinen eigenen Ablauf von rechtsläufiger und rückläufiger Bewegung, und jeder hat auch hellere und dunklere Phasen.

Die Methoden, mit denen man berechnete, wo sich bestimmte Planeten zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden würden, wurden durch diese Abläufe erheblich kompliziert. Eine Reihe von griechischen Astronomen entwickelte ein System der Planetenbahnen, wobei sie davon ausgingen, daß sich verschiedene Planeten auf kleinen Sphären bewegten, deren Mittelpunkte sich zwar wiederum auf größeren Sphären bewegten, zum Teil aber etwas verschoben waren, und so weiter. Es war tatsächlich alles sehr kompliziert. Das System wurde um 150 n. Chr. von dem griechischen Astronomen Claudius

Ptolemäus (um 100–170) in einem Buch zusammengefaßt. Der mathematische Aufbau des Universums, mit der Erde in der Mitte und verschiedenen Sphärensystemen um sie herum, wird ihm zu Ehren als *ptolemaïsches* oder als *geozentrisches* Weltbild bezeichnet (griechisch für »Erde als Mittelpunkt«). 1700 Jahre lang wurde es praktisch ausnahmslos akzeptiert, und kaum jemand hätte auch nur im Traum daran gedacht, es in Frage zu stellen. Falsch war es allerdings trotzdem.

Richtung wanderten, erneut umkehrten und diesen Vorgang ständig wiederholten. Er glaubte daher, daß sich Merkur und Venus um die Sonne drehten und die Sonne ihrerseits mit Merkur und Venus im Schlepptrajektorium die Erde kreiste. Diese Theorie hatte zwar einiges für sich, aber sie war für die meisten griechischen Astronomen nicht akzeptabel, die den Grundsatz festgelegt hatten, daß sich die Erde im Zentrum des Universums befand und alles andere ausnahmslos um sie kreiste.

Um 260 v. Chr. stellte der griechische Astronom Aristarch (um 310 – um 230 v. Chr.) eine noch radikalere These auf. Sie entsprang seinem Versuch, die Entfernung von der Sonne zu messen. Bei Halbmond befinden sich Mond, Erde und Sonne an den Endpunkten eines rechtwinkligen Dreiecks (ich werde ein wenig später noch darüber zu sagen haben). Es ist genau die Art von Dreieck, mit der sich die Trigonometrie befaßt; wenn man die genaue Größe der Winkel des Dreiecks kennt, kann man mit Hilfe trigonometrischer Methoden bestimmen, um wieviel die Sonne weiter als der Mond entfernt ist. Leider hatte Aristarch keine Instrumente zur Verfügung, die es ihm erlaubt hätten, die Winkel genau zu messen, und so lagen seine Schätzungen weit daneben. Trotzdem gelangte er zu dem Schluß, die Sonne müsse zwanzigmal so weit von der Erde entfernt sein wie der Mond. Da die Sonne am Himmel genauso wie der Mond erschien, obwohl sie zwanzigmal so weit entfernt war, mußte sie auch zwanzigmal größer sein.

Aufgrund dieser Ergebnisse schätzte er, daß der Durchmesser der Sonne siebenmal so groß sei wie der Erdurchmesser. Das war eine viel zu geringe Schätzung, aber sie genügte, um Aristarch von der Lächerlichkeit der Annahme zu überzeugen, daß eine riesige Sonne eine kleine Erde umkreise. Start dessen nahm er an, daß sich die Erde und alle anderen Planeten um die Sonne drehten.

Ein paar mutige Denker gab es doch, die die allgemein anerkannte Theorie von der Erde als Mittelpunkt des Universums anzweifelten. Der erste namentlich bekannte Mensch, der vermutete, daß sich die Erde nicht selbst im Zentrum des Universums befand, sondern um ein anderes Objekt herum – das den Mittelpunkt darstellt – durch den Weltraum bewegte, war der griechische Philosoph Philolaos (480?–? v. Chr.). Um 450 v. Chr. stellte er die Hypothese auf, daß sich die Erde, zusammen mit allen Planeten und der Sonne, um ein unsichtbares zentrales Feuer bewege, das man nur aufgrund seiner Widerspiegelung in der Sonne erkennen könne. Diese Theorie wurde weder durch Beweise noch durch logische Schlüsse untermauert, so daß niemand sie ernst nahm.

Ein Jahrhundert später, um 350 v. Chr., stellte der griechische Astronom Herakleides Pontikos (388–310 v. Chr.) eine vernünftigere Theorie auf. Er bemerkte, daß sich die Planeten nie sehr weit von der Sonne entfernen, sondern sich erst ein Stück weg bewegten, dann umkehrten, wieder ein Stück in die andere

Aristarch war der erste Mensch, von dem wir wissen, daß er die Sonne und nicht die Erde für den Mittelpunkt des Universums hielt. (Diese Vorstellung wird, nach den griechischen Wörtern für »Sonne als Mittelpunkt« als *heliozentrisches Weltbild* bezeichnet), aber es brachte ihm keinen Vorteil ein. Kaum ein Astronom nahm diesen Gedanken ernst.

Im Laufe der Jahrhunderte wurden die Astronomen trotzdem zum Verständnis des geozentrischen Weltbilds notwendig. Im Jahr 1252 ordnete König Alfons X. von Kastilien die Einstellung neuer Planetentafeln an, die ihm zu Ehren *Alfonzinesche Tafeln* genannt wurden. Verärgert sagte er: »Wenn der liebe Gott mich bei der Schöpfung um Rat gefragt hätte, hätte ich ein einfacheres System des Universums vorgeschlagen.« Im 16. Jahrhundert kam der deutsch-polnische Astronom Niklaus Kopernikus (1473–1543) auf den Gedanken, daß es im Tat ein einfacheres Modell des Universums gab – das von Aristarch vorgeschlagene heliozentrische Weltbild.

Aristarch hatte die Idee nur formuliert, aber keine Folgerungen daraus gezogen. Kopernikus dagegen verfolgte sie weiter und zeigte, daß ein heliozentrisches System die Rückläufigkeit der Planeten genauso problemlos erklären konnte wie die Tatsache, daß diese periodisch heller und dunkler wurden. Was aber noch entscheidender war: Das heliozentrische System machte es bedeutend einfacher, Planetentafeln zu berechnen.

Kopernikus zögerte mit der Veröffentlichung seiner Arbeit, weil er wußte, daß er mit der kirchlichen Obrigkeit in Konflikt geraten würde, die dem geozentrischen Weltbild verhaftet war und glaubte, auch die Bibel stütze diese Theorie. Sein handgeschriebenes Manuskript machte jedoch unter Astronomen die Runde und wurde 1543, in seinem Todesjahr, veröffentlicht. (Selbst in einem heliozentrischen Weltbild ist die

Erde nicht ganz als Mittelpunkt entthron; wenigstens der Mond umkreist nämlich die Erde.)

Der erste, der Planetentafeln anhand des heliozentrischen Modells berechnete, war der deutsche Astronom Erasmus Reinhold (1511–1553). Die Tafeln wurden 1551 unter der Schirmherrschaft des Herzogs Albert von Preußen veröffentlicht und deshalb *Tabulae Pruteniae* (Preußische Tafeln) genannt. Doch obwohl sie viel besser als die damals schon drei Jahrhunderte alten Alfonsinischen Tafeln waren, gab die alte Garde nicht auf. Die meisten Astronomen wollten am geozentrischen Weltbild festhalten, weil sie nicht glauben könnten, daß die Erde durch den Weltraum flog. Einige vertraten die Auffassung, daß das heliozentrische Weltbild zwar zu besseren Planetentafeln führe, aber trotzdem nur ein schlaues mathematisches Hilfsmittel sei, was nicht bedeute, daß sich die Erde *wirklich* um die Sonne drehe.

Der Streit ging noch ein halbes Jahrhundert lang weiter, bis ihn Galilei und sein Teleskop beilegten. 1610 betrachtete er den Planeten Jupiter und bemerkte, daß dieser vom Teleskop zu einer kleinen Lichtscheibe erweitert wurde. Dieser Anblick war der erste Hinweis darauf, daß der Jupiter tatsächlich eine Welt sein konnte. Zudem besaß er vier kleinere Welten, die ihn eindeutig so umkreisten wie der Mond die Erde. Solche Nebenwelten wurden (nach einem lateinischen Wort für »Leibwächter, Begleiter«) *Satelliten* getauft. Der Mond ist der Satellit der Erde, und Galilei hatte vier Satelliten des Jupiters entdeckt.

Die Bedeutung dieser Entdeckung lag seinerzeit darin, daß zumindest vier Himmelskörper offenbar *nicht* die Erde, sondern statt dessen den Jupiter umkreisten. Das bedeutete, daß die Erde mit Sicherheit nicht der Mittelpunkt von *allem* war. Natürlich konnte man einwenden, daß der Jupiter die Erde umkreise und dabei seine vier Satelliten mit sich führe, doch

dann studierte Galilei den Planeten Venus. Wenn die Venus – nach der alten geozentrischen Theorie – ein dunkler Himmelskörper war, der nur durch reflektiertes Licht erstrahlte, so mußte sie in einer Position zwischen Sonne und Erde stehen, daß sie immer als Sichel zu sehen war. Falls die heliozentrische Theorie stimmte, mußte die Venus wie unser Mond alle Phasen von der Sichel bis zur runden Scheibe durchlaufen. Und genau dies tat die Venus, wie Galilei herausfand.

Durch diese Entdeckung wurde das heliozentrische Weltbild nun im wesentlichen etabliert. Die Planeten einschließlich der Erde umkreisten die Sonne, und die Bezeichnung *Planeten* war ausschließlich für solche Himmelskörper reserviert. Mit anderen Worten: Die Sonne war kein Planet; sie war der Mittelpunkt. Der Mond war kein Planet, weil er die Erde umkreiste. Die Erde hingegen war ein Planet. Mit der Sonne als Mittelpunkt gab es damit nun sechs bekannte Planeten, die in dieser Reihenfolge um sie kreisten: Merkur, Venus, Erde (mit dem Mond), Mars, Jupiter (zusammen mit vier Satelliten) und Saturn. Für all diese Himmelskörper zusammen sollte sich der Ausdruck *Sonnensystem* einbügern.

Die Anhänger des alten Systems versuchten dagegen einzufordern, daß alles, was man durch das Teleskop sah, eine optische Täuschung sei, aber das rief nur Gelächter hervor. 1633 griff die katholische Kirche zu Zwangsmaßnahmen und ließ Galilei (unter Androhung von Folter) erklären, daß sich die Erde nicht drehe, doch ein Beweis war dies nicht. Die Vorstellung von einem Sonnensystem, das aus Planeten (darunter die Erde) besteht, die um die Sonne kreisen, ist seit der Zeit Galileis von allen gebildeten Menschen akzeptiert worden.

Natürlich warf das heliozentrische Weltbild einige Fragen auf. Die Sonne scheint einer Kreisbahn über den Himmel zu folgen, die in einem Winkel zum Äquator der Erde verläuft

und auf diese Weise die Jahreszeiten mit sich bringt. Wie funktioniert das in einem heliozentrischen System? Wenn die Erdachse senkrecht zu der Ebene stünde, auf der die Erde um die Sonne kreist, müßte die Sonne scheinbar direkt über dem Äquator über den Himmel wandern. Aber die Erdachse ist gegenüber der Senkrechten um $23,5^\circ$ geneigt – ein Neigungswinkel, der während des gesamten Umlaufs des Planeten um die Sonne konstant bleibt. Dies bedeutet, daß während einer Hälfte des Umlaufs das Nordende der Erdachse zur Sonne hin geneigt ist und die Mitternachtssonne damit nördlich des Äquators scheint. Während der anderen Hälfte neigt sich das Nordende der Sonne weg, so daß die Mitternachtssonne südlich des Äquators scheint. Dies erklärt genau das scheinbare Ansteigen und Absinken der Mitternachtssonne und den Zyklus der Jahreszeiten. Die wichtigen Abschnitte der Zeitmessung lassen sich nun als astronomische Erscheinung erkennen: Ein Tag ist der Zeitraum, in dem sich die Erde einmal um ihre eigene Achse dreht; ein Monat ist die Periode, in der sich der Mond um die Erde dreht, und ein Jahr ist der Zeitschnitt, den die Erde für einen Umlauf um die Sonne benötigt.

29. Läßt sich das kopernikanische Weltbild noch verbessern?

Jedewissenschaftliche Auffassung oder Theorie kann verbessert werden; in der Wissenschaft hört das Streben nach Vollkommenheit niemals auf. Das kopernikanische Weltbild unterscheidet sich nicht sehr vom protolaiischen. Es verlagert lediglich den Mittelpunkt des Universums von der Erde zur Sonne; um die Sonne herum befinden sich aber immer noch

und auf diese Weise die Jahreszeiten mit sich bringt. Wie funktioniert das in einem heliozentrischen System? Wenn die Erdachse senkrecht zu der Ebene stünde, auf der die Erde um die Sonne kreist, müßte die Sonne scheinbar direkt über dem Äquator über den Himmel wandern. Aber die Erdachse ist gegenüber der Senkrechten um $23,5^\circ$ geneigt – ein Neigungswinkel, der während des gesamten Umlaufs des Planeten um die Sonne konstant bleibt. Dies bedeutet, daß während einer Hälfte des Umlaufs das Nordende der Erdachse zur Sonne hin geneigt ist und die Mittagssonne damit nördlich des Äquators scheint. Während der anderen Hälfte neigt sich das Nordende von der Sonne weg, so daß die Mittagssonne südlich des Äquators scheint. Dies erklärt genau das scheinbare Ansteigen und Absinken der Mittagssonne und den Zyklus der Jahreszeiten. Die wichtigen Abschnitte der Zeitmessung lassen sich nun als astronomische Erscheinung erkennen: Ein Tag ist der Zeitraum, in dem sich die Erde einmal um ihre eigene Achse dreht; ein Monat ist die Periode, in der sich der Mond um die Erde dreht, und ein Jahr ist der Zeitabschnitt, den die Erde für einen Umlauf um die Sonne benötigt.

dann studierte Galilei den Planeten Venus. Wenn die Venus – nach der alten geozentrischen Theorie – ein dunkler Himmelskörper war, der nur durch reflektiertes Licht erstrahlte, so mußte sie in einer Position zwischen Sonne und Erde stehen, daß sie immer als Sichel zu sehen war. Falls die heliozentrische Theorie stimmte, mußte die Venus wie unser Mond alle Phasen von der Sichel bis zur runden Scheibe durchlaufen. Und genau dies tat die Venus, wie Galilei herausfand. Durch diese Entdeckung wurde das heliozentrische Weltbild nun im wesentlichen etabliert. Die Planeten einschließlich der Erde umkreisten die Sonne, und die Bezeichnung *Planeten* war ausschließlich für solche Himmelskörper reserviert. Mit anderen Worten: Die Sonne war kein Planet; sie war der Mittelpunkt. Der Mond war kein Planet, weil er die Erde umkreiste. Die Erde hingegen *war* ein Planet. Mit der Sonne als Mittelpunkt gab es damit nun sechs bekannte Planeten, die in dieser Reihenfolge um sie kreisten: Merkur, Venus, die Erde (mit dem Mond), Mars, Jupiter (zusammen mit vier Satelliten) und Saturn. Für all diese Himmelskörper zusammen sollte sich der Ausdruck *Sonnensystem* einbürgern. Die Anhänger des alten Systems versuchten dagegen einzuhören, daß alles, was man durch das Teleskop sah, eine optische Täuschung sei, aber das rief nur Geächter hervor: 1613 griff die katholische Kirche zu Zwangsmaßnahmen und ließ Galilei (unter Androhung von Folter) erklären, daß sich die Erde nicht drehe, doch ein Beweis war dies nicht. Die Vorstellung von einem Sonnensystem, das aus Planeten (darunter die Erde) besteht, die um die Sonne kreisen, ist seit der Zeit Galileis von allen gebildeten Menschen akzeptiert worden.

Natürlich warf das heliozentrische Weltbild einige Fragen auf. Die Sonne scheint einer Kreisbahn über den Himmel zu folgen, die in einem Winkel zum Äquator der Erde verläuft

29. Läßt sich das kopernikanische Weltbild noch verbessern?

Jede wissenschaftliche Auffassung oder Theorie kann verbessert werden; in der Wissenschaft hört das Streben nach Vollkommenheit niemals auf. Das kopernikanische Weltbild unterscheidet sich nicht sehr vom ptolemäischen. Es verlagert lediglich den Mittelpunkt des Universums von der Erde zur Sonne; um die Sonne herum befinden sich aber immer noch

die gleiche Länge ergibt. Je länglicher die Ellipse ist, desto weiter sind die beiden Brennpunkte vom Mittelpunkt entfernt. Kepler konnte 1609 zeigen, daß sich jeder Planet auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, wobei die Sonne in einem der Brennpunkte der Ellipse steht. Ebenso bewegt sich der Mond auf einer Ellipse um die Erde, wobei sich die Erde in einem der Brennpunkte befindet. Dies wird als das Erste Keplersche Gesetz bezeichnet. Es besagt, daß sich ein Planet an einem Ende seiner Umlaufbahn (oder seinem *Orbit* nach dem lateinischen Wort für »Kreis«, auch wenn es sich um keine Kreisbahn handelt) näher an der Sonne befindet als am anderen Ende und daß der Mond an einem Ende seiner Umlaufbahn näher an der Erde ist als am anderen Ende. Das Erste Keplersche Gesetz räumte endlich mit der Vorstellung von den kristallinen Sphären auf, die zweitausend Jahre lang ein Bestandteil der Astronomie gewesen waren.

Kepler entwickelte auch ein Verfahren, um zu berechnen, wie sich die Geschwindigkeit eines Planeten mit seiner Entfernung von der Sonne verändert. Je näher sich der Planet bei der Sonne befindet, desto schneller bewegt er sich laut einer speziellen mathematischen Relation (Zweites Keplersches Gesetz). Im Jahre 1619 erstellte Kepler dann eine Formel, die angibt, wie lange es dauert, bis ein Planet einmal die Sonne umkreist, wenn er sich in einem bestimmten Abstand von der Sonne befindet (Drittes Keplersches Gesetz). Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung eröffneten die Möglichkeit, ein Modell des Sonnensystems zu entwickeln, das genau zeigte, welche Ellipse jeder Planet hat und wie die Entfernung der Planeten zur Sonne miteinander in Beziehung stehen.

Wenn die kristallinen Sphären nicht existierten, mußten sich die Menschen natürlich fragen, was die Planeten auf ihrer

die alten kristallinen Sphären. Nun ist die Erde nicht mehr von sieben planetarischen Sphären umgeben, um die sich die achte und äußerste Sphäre mit den Sternen schließt, sondern die Sonne befindet sich im Mittelpunkt von sechs kristallinen Sphären und einer siebten und äußersten für die Sterne, während der Mond eine eigene, zusätzliche Sphäre besitzt, mit der er die Erde umschließt. Die Berechnung der Tafeln blieb recht kompliziert; obwohl die Ergebnisse leichter zu erhalten und genauer als vorher waren, gab es weiterhin viele Schwierigkeiten.

Der dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601) verbrachte viel Zeit damit, die Positionen der Planeten zu studieren. Er baute das erste bedeutende astronomische Observatorium der Neuzeit und entwarf Instrumente für die Bestimmung der Planetenpositionen. Er besaß jedoch keine Teleskope, die noch nicht erfunden waren. Trotzdem bestimmt er die Position von Planeten, besonders diejenigen des Mars, genauer, als es jemals zuvor gelungen war. Er glaubte, seine Berechnungen könnten die Erstellung genauerer Planetentafeln ermöglichen. Auch wenn er starb, bevor er diese Tafeln erstellen konnte, so hinterließ er die Zahlen doch seinem Schüler, dem deutschen Astronomen Johannes Kepler (1571–1630). Kepler arbeitete jahrelang mit diesen Zahlen und fand keine Kreisbahnen, die mit der Position der Planeten genau übereinstimmten. Dann fiel ihm plötzlich auf, daß er die Positionen des Mars bemerkenswert gut traf, wenn er statt dessen eine Ellipse (eine Art gedehnten Kreis) verwendete. Die Ellipse hat wie der Kreis einen Mittelpunkt, besitzt aber zusätzlich zwei Punkte, die sogenannten *Brennpunkte*, die sich beiderseits des Mittelpunkts auf dem größten Durchmesser befinden. Diese Brennpunkte liegen so, daß die Summe der beiden Abstände zwischen jedem beliebigen Punkt auf der Ellipse und den beiden Brennpunkten jeweils

Mutterhenne. Vielleicht, so spekulierte er, war dann die Erde aus der Sonne geboren worden.

Buffon ging von einem Zusammenstoß der Sonne mit einem anderen großen Himmelskörper aus und stellte sich vor, der Einschlag habe ein großes Stück der Sonne herausgelöst, das daraufhin abgekühlt und zur Erde geworden sei. Die These war interessant, erklärte aber weder die Existenz der anderen Planeten noch die Entstehung der Sonne; sie nahm einfach an, daß die Sonne schon da war.

Eine bessere Erklärung war notwendig. Nachdem Kepler sein Modell vom Sonnensystem entworfen hatte, war klar, daß es irgendwie eine Einheit darstellte. Alle Planeten bewegen sich fast in der gleichen Ebene (so daß das gesamte Modell des Sonnensystems in eine riesige Pizza-Schachtel passen würde), und sie kreisen alle in der gleichen Richtung um die Sonne, nicht anders als der Mond um die Erde und die Jupitermonde um den Jupiter. Außerdem drehen sie sich wie die Sonne alle in der gleichen Richtung um ihre eigene Achse. Die Astronomen vertraten die Ansicht, das Sonnensystem würde nicht diese Ähnlichkeiten aufweisen, wenn es nicht sozusagen in einem Stück entstanden wäre.

Die erste Theorie, die sich mit der Entstehung des Sonnensystems und nicht nur mit der Entstehung der Erde befaßte, war eine Folge der Erkenntnis, daß der Sternenhimmel mehr enthielt als nur Sterne. Im Jahre 1611, als das Teleskop gerade erst erfunden worden war, entdeckte der deutsche Astronom Simon Marius (1573–1624) einen leuchtenden Nebelfleck im Sternbild Andromeda, der als *Andromedanebel* bezeichnet wurde. 1694 entdeckte Huygens (der Erfinder der Pendeluhr) einen leuchtenden Nebelfleck im Sternbild Orion, den *Orionnebel*. Man fand auch noch weitere Nebel.

Es schien möglich, daß es sich bei solchen leuchtenden Wolkengruppen um riesige Zusammenballungen von Staub und Gas handeln.

Bahn hieß. Warum zogen sie nicht einfach in den Weltraum davon? Dieses Dilemma wurde von dem englischen Wissenschaftler Isaac Newton (1642–1727) gelöst, der die Bewegungsgesetze und eine allgemeine Gravitationstheorie entwickelte. Er erklärte, daß jeder Himmelskörper jedes andere Objekt nach einer einfachen mathematischen Formel anzieht. Diese Formel untermauerte eindrucksvoll die Keplerschen Gesetze und erklärte, was die Planeten auf ihrer Umlaufbahn hielten. Das von Kepler skizzierte Bild des Sonnensystems wird im Grundsatz heute noch verwender; die Wissenschaftler sind auch recht zufrieden damit, daß in Zukunft keine größeren Veränderungen mehr nötig sein werden.

30. Wie entstand die Erde?

Nachdem wir nun eine genaue Vorstellung vom Sonnensystem haben, können wir auch fragen, wie die Erde entstanden ist. Es ist nicht möglich, die Entstehung der Erde isoliert zu betrachten, denn wie wir noch sehen werden, muß sie als Teil des etwas Größeren entstanden sein, nämlich als Teil des Sonnensystems insgesamt. Was geschah also vor 4,6 Milliarden Jahren, das zur Entstehung der Erde – und des Sonnensystems überhaupt – führte?

Einer, der diese Frage aufgriff, ohne sich dabei auf die alte

biblische Legende zu beziehen (für die es selbstverständlich

keine wissenschaftlichen Beweise gibt), war der französische

Naturforscher Georges Louis de Buffon (1707–1788), der das

Alter der Erde auf 75 000 Jahre schätzte. 1749 überlegte Bu-

ffon, daß die Planeten, einschließlich der Erde, zur riesigen

Sonne etwa in der gleichen Beziehung stünden wie Küken zu

Sonne würde dort allerdings ihre Bahn über den Himmel ziehen und in 29½ Tagen eine volle Umdrehung durchführen. Tag und Nacht wären jeweils gut zwei Wochen lang. Der erste, der dies der Öffentlichkeit klarmachte, war Kepler in seiner 1634 posthum erschienenen Science-fiction-Erzählung *Somnium*.

37. Wie weit ist der Mond entfernt?

Schon die alten Griechen kamen zu dem Schluß, daß der Mond der uns nächste Himmelskörper sei, aber wie weit ist er genau entfernt?

Zwei Dinge über den Mond waren im Altertum unbekannt: seine Größe und seine Entfernung. Die beiden hängen miteinander zusammen. Wenn seine Größe bekannt wäre, könnte man mit Hilfe trigonometrischer Verfahren leicht ausrechnen, wie weit er entfernt sein muß, um in seiner sichtbaren Größe am Himmel zu stehen. Wenn umgekehrt der Abstand des Mondes zur Erde bekannt wäre, würde uns die Trigonometrie verraten, wie groß er in Wirklichkeit sein muß, um für uns so groß zu erscheinen. Wenn keine der beiden Größen bekannt ist, sitzt man in der Klemme.

Was ist zu tun? Man könnte zunächst nach dem Aussehen gehen. Wie groß wirkt der Mond? Wenn sie die Größe des Mondes schätzen sollten, würden manche Leute angeben, habe einen Durchmesser von vielleicht 30 Zentimetern, was natürlich nicht stimmen kann. Wenn er wirklich nur so groß wäre, dürfte er sich nur 17 Meter über dem Boden befinden und wäre nicht einmal hinter einem hohen Gebäude, geschweige denn einem Berg zu sehen. Wenn der Mond die

Berge der Erde unter sich lassen will, muß er wenigstens 9 Kilometer über dem Boden sein – und in diesem Fall muß sein Durchmesser mindestens 90 m betragen.

Es ist gut möglich, daß er noch weiter von der Erde entfernt und deshalb noch größer ist. Um 460 v. Chr. vertrar der griechische Philosoph Anaxagoras (um 500–428 v. Chr.) die Ansicht, die Sonne sei ein lodender Felsblock von ungefähr 160 Kilometern Durchmesser (und in diesem Fall sei auch der Mond recht groß). Diese Vorstellung erweckte in Athen nicht nur Feindseligkeit, sondern auch den Vorwurf der Gottlosigkeit und mangelnder Frömmigkeit, so daß Anaxagoras überstürzt die Stadt verlassen mußte, um sein Leben zu retten.

Was kann man also tun? Es hat keinen Sinn, zu raten. Gibt es irgendeine Möglichkeit, die Entfernung von etwas zu bestimmen, das man nicht erreichen kann? Eine solche gibt es tatsächlich.

Halten Sie einen Finger vor das Gesicht und schließen Sie nur das linke Auge. Sie sehen den Finger dann mit dem rechten Auge, und es sieht so aus, als befände er sich direkt vor Ihnen an der Wand. Bewegen Sie den Finger nicht, aber öffnen Sie das linke und schließen Sie das rechte Auge. Jetzt sehen Sie den Finger mit dem linken Auge, und seine Position an der Wand scheint sich verändert zu haben. Sie beobachten den Finger mit dem linken und dem rechten Auge aus verschiedenen Winkeln.

Diese Verschiebung eines Gegenstands, der aus zwei verschiedenen Blickwinkeln beobachtet wird, nimmt zu, je weiter Sie sich dem Gegenstand nähern, und nimmt ab, je weiter Sie sich von ihm entfernen. Sie wird als *Parallaxe* bezeichnet. Falls Sie ein fernes Objekt von zwei verschiedenen Positionen aus beobachten und wissen, wie groß der Abstand zwischen den beiden Positionen ist, und falls Sie dann unter Zuhilfenahme der Trigonometrie noch die Größe der Parallaxe messen können, sind Sie selbst dann imstande, die Entfer-

Zweifel, daß sie irgend jemand glauben konnte, der damals von Hipparchos Messungen hörte. Wenn der Mond 385 000 Kilometer entfernt war, mußte er schließlich einen Durchmesser von fast 3500 Kilometer haben. Da dies ein wenig mehr als ein Viertel des Erdurchmessers ist, konnte man den Mond nicht mehr einfach als Silberscheibe am Himmel akzeptieren, sondern mußte ihn als eine eigene Welt ansehen. Die Messung der Entfernung vom Mond konnte von den alten Griechen gerade noch bewältigt werden; die Parallaxen aller anderer Himmelskörper waren aber zu klein, um noch meßbar zu sein. Trotzdem war die Entfernung des Mondes groß genug, um der Menschheit eine erste Vorstellung davon zu geben, daß das Universum riesig ist und noch andere Welten als die Erde enthält.

Wenn es noch Zweifel daran gab, wurden sie 1609 ausgeräumt, als Galilei sein Teleskop auf den Mond richtete. Er sah Gebirgsketten, Ebenen und Formationen, die wie Vulkankrater aussahen. Genau diese Erscheinungen waren auch für die Musterung des Mondes verantwortlich, die man sogar ohne Teleskop von der Erde aus erkennen konnte. Der Mond war also ganz bestimmt eine Welt.

38. Wie groß ist die Masse des Mondes?

nung des Objekts zu messen, wenn Sie es nicht erreichen können. Landvermesser (Geometer) können die Parallaxe beispielsweise dazu einsetzen, die Entfernung zu einem Objekt auf der anderen Seite eines Flusses zu bestimmen. Kann man das Verfahren der Parallaxe auch auf den Mond anwenden? Natürlich, denn alles verschiebt sich und zeigt eine Parallaxe, wenn man seinen Standort verändert, aber bei feinen Objekten ist die parallaktische Verschiebung so gering, daß man genausogut sagen könnte, sie würden sich überhaupt nicht verschieben. Wenn der Mond also von zwei Orten aus beobachtet wird, die mehrere hundert Kilometer auseinanderliegen, wird er seine Position im Vergleich zu den weit entfernten Sternen leicht verändern. Dies bedeutet, daß ein Astronom messen könnte, wie weit der Mond zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Nacht von einem bestimmten Stern entfernt ist. (Der Abstand wird in Winkeln gemessen. Eine Linie, die in einem großen Kreis um den Himmel gezogen wird, läßt sich in 360 gleiche *Grad* einteilen. Ein Grad besteht aus 60 gleichen *Bogenminuten*, von denen jede wiederum in 60 gleichen *Bogensekunden* unterteilt ist.) Weit davon entfernt mißt ein anderer Astronom um dieselbe Uhrzeit in der gleichen Nacht den Abstand zwischen dem Mond und diesem Stern. Die beiden Abstände werden verglichen, und wenn es einen Unterschied gibt, handelt es sich dabei um die Parallaxe, so daß sich die Entfernung zum Mond bestimmen läßt.

Dies wurde erstmals um 150 v. Chr. von dem griechischen Astronomen Hipparch (um 190 – um 120 v. Chr.) durchgeführt, der herausfand, daß die Entfernung zum Mond dem dreißigfachen Erdurchmesser entsprach. Demnach wäre der Mond etwa 385 000 Kilometer von uns entfernt, was sich ziemlich genau mit dem tatsächlichen Wert deckt.

Es muß eine verblüffende Zahl gewesen sein, und ich habe

Selbst, wenn ein Astronom des Altertums bereit war, Hipparchos Vorstellung vom Mond zu teilen, und diesen für eine gewaltige Welt hielt, konnte er anführen, daß Himmelskörper aus reinem Licht zusammengesetzt und materielos seien. Sie möchten deshalb nicht größer als beispielsweise eine Wolke oder ein Schatten sein.

nung des Objekts zu messen, wenn Sie es nicht erreichen können. Landvermesser (Geometer) können die Parallaxe beispielsweise dazu einsetzen, die Entfernung zu einem Objekt auf der anderen Seite eines Flusses zu bestimmen.

Kann man das Verfahren der Parallaxe auch auf den Mond anwenden? Natürlich, denn alles verschiebt sich und zeigt eine Parallaxe, wenn man seinen Standort verändert, aber bei fernen Objekten ist die parallaktische Verschiebung so gering, daß man genausogut sagen könnte, sie würden sich überhaupt nicht verschieben. Wenn der Mond also von zwei Orten aus beobachtet wird, die mehrere hundert Kilometer auseinanderliegen, wird er seine Position im Vergleich zu den weit entfernten Sternen leicht verändern.

Dies bedeutet, daß ein Astronom messen könnte, wie weit der Mond zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Nacht von einem bestimmten Stern entfernt ist. (Der Abstand wird in Winkeln gemessen. Eine Linie, die in einem großen Kreis um den Himmel gezogen wird, läßt sich in 360 gleiche Grad einteilen. Ein Grad besteht aus 60 gleichen *Bogenminuten*, von denen jede wiederum in 60 gleiche *Bogensekunden* unterteilt ist.) Weit davon entfernt mißt ein anderer Astronom um dieselbe Uhrzeit in der gleichen Nacht den Abstand zwischen dem Mond und diesem Stern. Die beiden Abstände werden verglichen, und wenn es einen Unterschied gibt, handelt es sich dabei um die Parallaxe, so daß sich die Entfernung zum Mond bestimmen läßt.

Dies wurde erstmals um 150 v. Chr. von dem griechischen Astronomen Hipparch (um 190 – um 120 v. Chr.) durchgeführt, der herausfand, daß die Entfernung zum Mond dem dreißigfachen Erdurchmesser entsprach. Dennach wäre der Mond etwa 385 000 Kilometer von uns entfernt, was sich ziemlich genau mit dem tatsächlichen Wert deckt. Es muß eine verblüffende Zahl gewesen sein, und ich habe

Zweifel, daß sie irgend jemand glauben konnte, der damals von Hipparchs Messungen hörte. Wenn der Mond 385 000 Kilometer entfernt war, mußte er schließlich einen Durchmesser von fast 3500 Kilometer haben. Da dies ein wenig mehr als ein Viertel des Erdurchmessers ist, konnte man den Mond nicht mehr einfach als Silberscheibe am Himmel akzeptieren, sondern mußte ihn als eine eigene Welt ansehen. Die Messung der Entfernung vom Mond konnte von den alten Griechen gerade noch bewältigt werden; die Parallaxen aller anderer Himmelskörper waren aber zu klein, um noch meßbar zu sein. Trotzdem war die Entfernung des Mondes groß genug, um der Menschheit eine erste Vorstellung davon zu geben, daß das Universum riesig ist und noch andere Welten als die Erde enthält.

Wenn es noch Zweifel daran gab, wurden sie 1609 ausgeräumt, als Galilei sein Teleskop auf den Mond richtete. Er sah Gebirgsketten, Ebenen und Formationen, die wie Vulkankrater aussahen. Genau diese Erscheinungen waren auch für die Musterung des Mondes verantwortlich, die man sogar ohne Teleskop von der Erde aus erkennen konnte. Der Mond war also ganz bestimmt eine Welt.

38. Wie groß ist die Masse des Mondes?

Selbst wenn ein Astronom des Altertums bereit war, Hipparchs Vorstellung vom Mond zu teilen, und diesen für eine gewaltige Welt hielt, konnte er anführen, daß Himmelskörper aus reinem Licht zusammengesetzt und materielos seien. Sie möchten deshalb nicht größer als beispielsweise eine Wolke oder ein Schatten sein.

Es kam somit darauf an, die *Masse* des Mondes zu bestimmen – wieviel Materie er sozusagen enthält. Aber wie läßt sich das schaffen? Man kann ihn nicht wiegen oder Kraft auf ihn ausüben, um seine Richtung zu ändern. Ebensowenig konnte man (jedenfalls bis 1969) zum Mond fliegen, um die Anziehungskraft an seiner Oberfläche zu messen und die Masse auf diese Weise zu bestimmen.

Was man aber tun kann, ist, die Anziehungskraft des Mondes (sofern vorhanden) auf die Erde zu messen. Um eine Antwort zu erhalten, denken wir uns eine Wippe, die sich ja leicht vorstellen läßt. Man nehme ein langes, flaches Brett, das drehbar über einer Achse liegt und auf dessen Enden jeweils ein Kind sitzt. Ein Kind befindet sich unten, mit den Füßen auf dem Boden. Es stößt sich ab, so daß sein Brettende nach oben steigt und sich das andere nach unten senkt. Sobald das andere Kind den Boden erreicht, stößt es sich ab, und die Bewegung kehrt sich um. Das kann so lange weitergehen, wie es den Kindern gefällt.

Aber nehmen wir einmal an, ein Kind sei viel schwerer als das andere. Das schwere Kind kann sich an seinem Ende der Wippe zwar abstoßen, doch dieses steige nur ein bißchen nach oben und käme gleich wieder herunter, denn das Gewicht des leichten Kindes würde nicht ausreichen, um das Brett auf dessen Seite nach unten zu drücken und das schwere Kind in der Luft zu halten. Die Wippe würde in diesem Fall nicht funktionieren.

Der Ausweg bestünde darin, die Wippe näher am schweren Kind auszubalancieren. Je näher sich der Drehpunkt am schweren Kind befindet, desto schwerer fällt es diesem, das Ende unten zu halten, und desto leichter ist es gleichzeitig dem leichten Spielkameraden, der weiter vom Drehpunkt entfernt ist. Schließlich findet man eine Stelle für den Drehpunkt, die es beiden Kindern gleich schwer macht, ihre Seite

hinunterzudrücken – und die Wippe befindet sich wieder im Gleichgewicht.

Wegen Sie nun die Kinder und messen ihren jeweiligen Abstand zum Drehpunkt. Wenn sich die Wippe im Gleichgewicht befindet, so zeigt sich folgendes: Falls das schwere Kind doppelt so viel wiegt wie das andere Kind, muß das leichte also nur das Gewicht des einen Kindes kennt und dann den jeweiligen Abstand der beiden zum Drehpunkt mißt, wobei die Wippe im Gleichgewicht ist; kann man auch das Gewicht des anderen Kindes bestimmen, ohne es direkt wiegen zu müssen. Dies ist das *Hekelgesetz*, das erstmals um 250 v. Chr. von dem griechischen Mathematiker Archimedes (287–212 v. Chr.) aufgestellt und mathematisch in allen Einzelheiten ausgearbeitet wurde.

Die Beziehung zwischen Erde und Mond ist so ähnlich wie die zwischen den beiden Kindern auf der Wippe. Die Schwerkraft der Erde zieht am Mond, so daß sich der Mond um die Erde dreht; gleichzeitig zieht aber die Schwerkraft des Mondes die Erde an, so daß auch bei der Erde die Neigung vorhanden ist, sich um den Mond zu drehen.

Wenn die Erde und der Mond genau die gleiche Masse hätten, wäre die Neigung bei beiden gleich stark, und die Erde wie der Mond würden um einen Punkt rotieren, der genau in der Mitte zwischen dem Mittelpunkt der Erde und dem Mittelpunkt des Mondes liegt, wobei sich die beiden Körper auf ihrer Umlaufbahn genau gegenüber ständen.

Falls aber die Erde schwerer als der Mond ist, muß der *Schwerpunkt*, um den sich beide drehen, näher beim Erdmittelpunkt liegen, genau wie sich der Drehpunkt der Wippe näher beim schweren Kind befinden muß. Die Erde besitzt eine erheblich größere Masse als der Mond, so daß der Schwerpunkt recht nahe beim Erdmittelpunkt liegt, so nahe, daß wir ein-

fach davon ausgehen können, daß sich der Mond um die Erde dreht und die Erde an Ort und Stelle bleibt. Dennoch steht die Erde *nicht* still. Sie vollführt jeden Monat einen kleinen Kreis um den Schwerpunkt, und der Mittelpunkt der Erde befindet sich von dieserem Punkt aus gesehen jeweils auf der anderen Seite als der Mond. Man kann die Bewegung der Sterne im Laufe eines Monats beobachtet. Da Größe dieses kleinen Kreises bestimmen, indem man die Erde jeden Monat einen kleinen Kreis ausführt, scheinen die Sterne in umgekehrter Richtung ebenfalls einen kleinen Kreis zu beschreiben.

Der Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems ist 81,3 mal näher am Erdmittelpunkt als am Mittelpunkt des Mondes. Das Zentrum des Erde-Mond-Systems ist etwa 4700 Kilometer vom Erdmittelpunkt entfernt; das sind 1600 Kilometer unterhalb der Erdoberfläche. Es sieht also offensichtlich so aus, als drehe sich nur der Mond. Dies bedeutet auch, daß die Masse des Mondes $\frac{1}{81,3}$ (oder 1,2 Prozent) der Masse der Erde beträgt. Das klingt nach nicht besonders viel, bedeutet aber immerhin, daß der Mond eine Masse von 740 000 Milliarden Kilogramm besitzt. Da der Mond eine geringere Masse besitzt, hat er auch eine geringere Anziehungskraft. Sie glauben nun vielleicht, wir hätten auf dem Mond nur das $\frac{1}{81,3}$ fache Gewicht wie auf der Erde, aber dabei ist zu beachten, daß man sich auf dem Mond, der ja kleiner ist als die Erde, entsprechend näher beim Mittelpunkt des Körpers befindet. Man hätte dort also ein Sechstel des Gewichts, das man auf der Erde hat.

Nachdem wir nun die Masse und die Größe des Mondes kennen, können wir auch seine Dichte errechnen.

Sie beträgt $3,34 \text{ g/cm}^3$ und beläßt sich damit auf nur drei Fünftel der Erddichte. Daraus läßt sich sofort ableiten, daß der Mond nicht wie die Erde einen Eisenkern hat, sondern durch und

durch aus Gestein bestehen muß. Da der Mond außerdem kleiner ist als die Erde, liegt die Temperatur in seinem Inneren niedriger als im Erdinneren. Und da Gestein nicht so leicht schmilzt wie Eisen, können wir mit Sicherheit annehmen, daß der Mond keinen wie auch immer gearteten flüssigen Kern besitzt.

Ohne flüssigen Kern gibt es im Mondinneren aber nichts, was sich drehen könnte, und selbst wenn es einen solchen Kern gäbe, würde der Mond viel zu langsam rotieren, um diese Wirkung in Bewegung zu setzen. Wir können also folgern, daß der Mond kein Magnetfeld hat. Als Sonden zum Mond geschickt wurden, um seine magnetischen Eigenschaften zu untersuchen, entdeckte man, daß diese Annahme stimmte: Im Gegensatz zur Erde ist der Mond kein Magnet.

Von den anderen Planeten rotiert der Mars recht schnell, aber auch er hat keinen Eisenkern. Merkur und Venus haben zwar beide einen Eisenkern, rotieren aber sehr langsam. Folglich sind auch diese Welten keine Magnete. (Merkur weist einen ganz geringen Magnetismus auf, was rätselhaft ist.)

39. Was sind die Gezeiten?

Die dem Mond zugewandte Seite der Erde befindet sich stets um 7 Prozent näher am Mond als die von ihm abgewandte Seite. Dies bedeutet, daß erstere einer etwas stärkeren Anziehungs Kraft durch den Mond ausgesetzt ist als letztere. Die Erde streckt sich daher leicht entlang einer Linie, die ihren Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt des Mondes verbindet, und es kommt auf beiden Seiten zu einer Ausbauchung.

fach davon ausgehen können, daß sich der Mond um die Erde dreht und die Erde an Ort und Stelle bleibt. Dennoch steht die Erde *nicht* still. Sie vollführt jeden Monat einen kleinen Kreis um den Schwerpunkt, und der Mittelpunkt der Erde befindet sich von diesem Punkt aus gesehen jeweils auf der anderen Seite als der Mond. Man kann die Größe dieses kleinen Kreises bestimmen, indem man die Bewegung der Sterne im Laufe eines Monats beobachtet. Da die Erde jeden Monat einen kleinen Kreis ausführt, scheinen die Sterne in umgekehrter Richtung ebenfalls einen kleinen Kreis zu beschreiben.

Der Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems ist 81,3 mal näher am Erdmittelpunkt als am Mittelpunkt des Mondes. Das Zentrum des Erde-Mond-Systems ist etwa 4700 Kilometer vom Erdmittelpunkt entfernt; das sind 1600 Kilometer unterhalb der Erdoberfläche. Es sieht also offensichtlich so aus, als drehe sich nur der Mond. Dies bedeutet auch, daß die Masse des Mondes $\frac{1}{81,3}$ (oder 1,2 Prozent) der Masse der Erde beträgt. Das klingt nach nicht besonders viel, bedeutet aber immerhin, daß der Mond eine Masse von 740 000 Milliarden Kilogramm besitzt. Da der Mond eine geringere Masse besitzt, hat er auch eine geringere Anziehungskraft. Sie glauben nun vielleicht, wir hätten auf dem Mond nur das $\frac{1}{81,3}$ -fache Gewicht wie auf der Erde, aber dabei ist zu beachten, daß man sich auf dem Mond ja kleiner ist als die Erde, entsprechend näher beim Mittelpunkt des Körpers befindet. Man hätte dort also ein Sechstel des Gewichts, das man auf der Erde hat.

Nachdem wir nun die Masse und die Größe des Mondes

kennen, können wir auch seine Dichte errechnen. Sie beträgt

$3,34 \text{ g/cm}^3$ und beläßt sich damit auf nur drei Fünftel der

Erddichte. Daraus läßt sich sofort ableiten, daß der Mond

nicht wie die Erde einen Eisenkern hat, sondern durch und

durch aus Gestein bestehen muß. Da der Mond außerdem kleiner ist als die Erde, liegt die Temperatur in seinem Inneren niedriger als im Erdinneren. Und da Gestein nicht so leicht schmilzt wie Eisen, können wir mit Sicherheit annehmen, daß der Mond keinen wie auch immer gearteten flüssigen Kern besitzt.

Ohne flüssigen Kern gibt es im Mondinneren aber nichts, was sich drehen könnte, und selbst wenn es einen solchen Kern gäbe, würde der Mond viel zu langsam rotieren, um diese Wirbel in Bewegung zu setzen. Wir können also folgern, daß der Mond kein Magnetfeld hat. Als Sonden zum Mond geschickt wurden, um seine magnetischen Eigenschaften zu untersuchen, entdeckte man, daß diese Annahme stimmte: Im Gegensatz zur Erde ist der Mond kein Magnet. Von den anderen Planeten rotiert der Mars recht schnell, aber auch er hat keinen Eisenkern. Merkur und Venus haben zwar beide einen Eisenkern, rotieren aber sehr langsam. Folglich sind auch diese Welten keine Magneten. (Merkur weist einen ganz geringen Magnetismus auf, was rätselhaft ist.)

39. Was sind die Gezeiten?

Die dem Mond zugewandte Seite der Erde befindet sich stets um 7 Prozent näher am Mond als die von ihm abgewandte Seite. Dies bedeutet, daß erstere einer etwas stärkeren Anziehungs Kraft durch den Mond ausgesetzt ist als letztere. Die Erde streckt sich daher leicht entlang einer Linie, die ihren Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt des Mondes verbindet, und es kommt auf beiden Seiten zu einer Ausbauchung.

Die feste Oberfläche der Erde gibt kaum nach, aber die Ozeane sind weniger kompakt und wölben sich erheblich stärker als das Festland. Das Meer schwellt also an zwei Stellen an:

Die eine weist zum Mond hin, die andere von ihm weg. Während sich die Erde dreht, bewegt sich ihre gesamte Landfläche erst in die Ausbauchung des Meeres hinein und anschließend wieder aus ihr heraus.

Vom Land aus gesehen, scheint der Meeresspiegel zweimal am Tag zunächst bis zum höchsten Punkt der Flut (*Hochwasser*) anzusteigen, bevor er dann zum niedrigsten Punkt der Ebbe (*Niedrigwasser*) absinkt. Da sich der Mond zwischen einer Flut und der nächsten auf seiner Umlaufbahn bewegt, wäre ein bestimmter Punkt auf dem Festland der Erde alle 12½ Stunden der Flut ausgesetzt.

Wenn das schon alles wäre, hätten die Menschen bereits von prähistorischer Zeit an die Gezeiten mit dem Mond in Zusammenhang gebracht. Es gibt jedoch Komplikationen dabei. Auch die Sonne erzeugt Gezeiten, selbst wenn diese nur ein Drittel so hoch sind wie die des Mondes. Und wenn sich Sonne und Mond bei Vollmond und Neumond auf derselben geraden Linie befinden, steigen die Gezeiten höher an und fallen tiefer ab als gewöhnlich. Wenn Sonne und Mond im rechten Winkel an der Erde ziehen, wie es bei Halbmond im Fall ist, sind die Gezeiten schwächer ausgeprägt als normal. Bei Voraussagen, wann eine Flut einsetzt und wie hoch sie steigt, muß auch die Küstenform berücksichtigt werden.

Die frühesten Zivilisationen des Abendlandes siedelten an den Küsten des Mittelmeeres, das fast völlig von Land umschlossen ist. Bei Flut strömt Wasser vom Atlantik durch die enge Straße von Gibraltar in das Mittelmeer, aber lange, bevor der Vorgang abgeschlossen ist, setzt bereits die Ebbe ein, so daß das Wasser wieder hinausfließt. Umgekehrt kommt lange

vor dem Abschluß dieses Vorgangs schon wieder die Flut, weshalb die Veränderung des Wasserstandes im Mittelmeer letzlich nur sehr gering ausfällt.

Um 300 v. Chr. segelte der griechische Entdecker Pytheas (etwa 300? v. Chr.) zum ersten Mal aus dem Mittelmeer hinaus. Er fuhr über den Atlantik zu den Britischen Inseln und weiter nach Skandinavien und stieß dabei auf das Phänomen der Gezeiten. In seinem Bericht darüber stellte er sogar die Vermutung auf, daß es etwas mit dem Mond zu tun habe, doch man schenkte ihm kaum Beachtung. Als Julius Cäsar einen Feldzug nach Britannien führte, ließ er seine Schiffe ziemlich weit unten am Strand liegen und verlor sie beinahe an eine unerwartete hohe Flut. Da er aber Cäsar war, korrigierte er seinen Fehler schnell.

Der Zusammenhang mit dem Mond war nicht leicht zu akzeptieren, solange man das Phänomen der Schwerekraft noch nicht verstanden hatte. Galilei beispielsweise, der sonst ein so unfehlbarer Denker war, lachte über jede Vermutung, daß der Mond einen Einfluß auf die Erde haben könnte; er hielt die Gezeiten einfach für das Schwappen des Ozeans, wenn sich die Erde drehte. Erst nachdem Newton 1687 die allgemeine Gravitationstheorie aufgestellt hatte, konnte man die Gezeiten völlig verstehen.

40. Wie wird die Erde von den Gezeiten beeinflußt?

Die Gezeiten sind von großer Bedeutung für die Schiffahrt. Wenn die Flut einsetzt, ist das Wasser im Hafen tiefer, so daß ein schwer beladenes Schiff weniger leicht auf Grund läuft oder mit Sandbänken, Riffen und Felsen Probleme bekommt. Schiffe laufen deshalb bevorzugt mit der Flut aus. Wenn sie aus irgendeinem Grund nicht zu diesem Zeitpunkt abfahren können, müssen sie selbst bei größter Eile auf die nächste Flut warten.

Doch es gibt noch eine nachhaltigere, wenn auch weniger unmittelbar spürbare Wirkung der Gezeiten. Während sich die Erde unter den beiden Ausbauchungen des Meeres hindurchdreht, ist das Wasser an manchen Stellen seicht genug, um eine beträchtliche Reibung zwischen Wasser und Land zu erzeugen, wenn sich beide gegeneinander bewegen. Das Wasser »schabt« über weite Flächen am Meeresgrund, wenn es bei Flut vordringt und sich bei Ebbe wieder zurückzieht. Diese Reibung wirkt genauso wie die Reibung der Bremsbeläge beim Auto. Ein Teil der Drehbewegung der Erde wird durch das Schaben der Gezeiten aufgebraucht; der Planet wird abgebremst. Die Drehung der Erde ist aber so stark, daß die Bremswirkung nur minimal zu Buche schlägt. Tatsächlich verlängert sich der Tag durch die Wirkung der Gezeiten in 62 500 Jahren nur um eine Sekunde. Obwohl die Verkürzung insgesamt sehr langsam vor sich geht, summiert sie sich trotzdem. Selbst ein paar zusätzliche Zehntausendstelsekunden pro Jahr bedeuten, daß der von einer totalen Sonnenfinsternis verursachte Schatten gegenüber dem Schatten der vorigen Sonnenfinsternis um 100 Kilometer verschoben ist; wenn der Tag auf den Bruchteil einer Sekunde

immer genau die gleiche Länge hätte, würde der Schatten dagegen immer auf dieselbe Stelle fallen. Diese Verschiebung der frühen Sonnenfinsternisse erlaubt es, die langsame Verlängerung des Tages zu berechnen.

Die Erddrehung kann aber nicht abgebremst werden, ohne daß dies an anderer Stelle zu einer Auswirkung führt. Die Erde besitzt aufgrund ihres Spins ein Drehmoment, das nicht völlig vernichtet werden kann. Wenn der Spin der Erde abnimmt, nimmt der Spin des Mondes zu, so daß sich der Mond bei einem länger werdenden Tag etwas von der Erde entfernt und einen größeren Bogen um sie beschreibt.

Natürlich hat die Erde auch einen Gezeiteeffekt auf den Mond. Da die Erde 81,3 mal so massereich wie der Mond ist, erzeugt sie eine weit größere Gezeitenwirkung (auch wenn die geringere Größe des Mondes den Effekt ein wenig vermindert). Der Mond hat ein geringeres Drehmoment als die Erde; seine Rotation wird deshalb leichter abgebremst, wenn die Gesteinschichten an der Oberfläche aufgrund des Gezeiteeffekts gegen die darunter liegenden Schichten gedrückt werden. Als Folge davon hat sich die Rotation des Mondes soweit verlangsamt, daß sich der Mond während eines Umlaufs um die Erde nur einmal dreht. Er wendet also der Erde nur eine einzige Seite zu, so daß die gezeitenbedingte Ausbauchung sowohl auf der erdzugewandten als auch auf der gegenüberliegenden Seite unveränderlich ist und der Mond durch den Gezeiteeffekt der Erde keine weitere Verlangsamung mehr erfährt. So ist es kein Zufall, daß die Drehung des Mondes um seine eigene Achse und sein Umlauf um die Erde dieselbe Zeit in Anspruch nehmen; es ist eine Folge der Gezeitenwirkung.

Sonne entfernt oder den Kometen vollends aus dem Sonnensystem hinausträgt. Sie kann sich auch verlangsamen, wodurch sich der Komet dann auf die inneren Planeten des Sonnensystems zu bewegt und dicht an der Sonne vorbeifliegt. In diesem Falle erscheint er vielleicht als großartiges Schauspiel am Erdball. Da der Komet seine neue Umlaufbahn beibehält (wenn sie nicht durch die Anziehung eines Planeten verändert wird), verdampft er schließlich und erlischt.

Oott vermutet, daß seit der Entstehung des Sonnensystems ein Fünftel aller Kometen entweder aus dem Sonnensystem hinausgetragen wurden oder in Sonnen Nähe abgedriftet und dort verdampft ist. Damit bleiben aber immer noch vier Fünftel des ursprünglichen Vorrats übrig, der auch weiterhin für Nachschub an Kometen dient.

53. Wie weit ist die Sonne entfernt?

Im Zusammenhang mit der Entdeckung der Planetoiden habe ich auch die Abstände der Planeten erwähnt; diese Entfernung waren zur Zeit dieser Entdeckung bereits bekannt. Allerdings blieb die Entfernung vom Mond, nachdem Hipparch sie bestimmt hatte, über achtzehn Jahrhunderte lang die einzige bekannte Entfernung; es gab einfach keine Möglichkeit, die Parallaxe eines noch weiter entfernten Objekts zu messen.

Wie ich bereits beschrieben habe, unternahm schon der griechische Astronom Aristarch (um 310 – um 230 v. Chr.) einen Versuch, die Entfernung von der Sonne zu bestimmen, ohne die Parallaxe zu Hilfe zu nehmen. Seine Methode war im

Jahre 270 v. Chr. theoretisch völlig korrekt, aber er besaß keine Möglichkeit, Winkel am Himmel genau zu messen, weshalb seine Schätzungen auch weit daneben lagen. Er kam schließlich zu dem Ergebnis, daß die Sonne etwa 8 Millionen Kilometer von der Erde entfernt sei und den siebenfachen Erddurchmesser habe.

Diese Schätzung war viel zu niedrig gegriffen, aber sie reichte aus, um Aristarch auf den Gedanken zu bringen, daß sich die Erde um die Sonne drehe und nicht umgekehrt. Doch niemand nahm seine Zahlen oder seine Schlußfolgerung ernst. Im 17. Jahrhundert jedoch, nach der Erfindung des Teleskops, konnte man die Position eines Himmelskörpers viel genauer bestimmen (insbesondere seit man ein Fadenkreuz vor die Linse gesetzt hatte). Dies bedeutete, daß eine geringe Veränderung der Position eines Objekts, die mit dem bloßen Auge nicht wahrnehmbar war, d. h. eine winzige parallaktische Verschiebung, nun mit dem Teleskop gemessen werden konnte. Um die Entfernung zur Sonne zu bestimmen, war es aber Tat eine schwierige Aufgabe, denn es ist insbesondere deshalb fast unmöglich, die Position ihres glühenden Randes festzulegen, weil am Himmel immer dann keine Sterne zu sehen sind, im Verhältnis zu denen man die Position messen könnte, wenn die Sonne scheint.

Start dessen konnte die Parallaxe für jeden beliebigen Planeten bestimmt werden. Dank Keplers Modell des Sonnensystems, das noch heute als richtig angesehen wird, konnte die Entfernung jedes Planeten in jeder beliebigen Position auf seiner Bahn um die Sonne dazu benutzt werden, um die Entfernung aller Planeten voneinander, von der Sonne und von der Erde zu berechnen. Mit Hilfe dieser Angaben konnte man dann auch errechnen, wie weit die Erde von der Sonne entfernt ist.

stems. Dessen Größe übertraf bei weitem die wildesten Träume Aristotehs und Hipparchs, aber wie wir noch sehen werden, hat sich das bekannte Universum in den drei Jahrhunderten seitdem noch stärker ausgedehnt und das Universum Cassinis zu einem fast unsichtbaren Punkt schrumpfen lassen.

54. Ist die Erde groß?

Im Jahre 1672 hielt der italienisch-französische Astronom Gian Domenico Cassini die genaue Position des Mars am Himmel von Paris fest. Zur selben Zeit bestimmte ein anderer französischer Astronom, Jean Richer (1630–1696), im fernen Französisch-Guyana den Standort des Mars am dortigen Himmel. Die beiden Positionen waren im Verhältnis zu den benachbarten Sternen leicht verschoben. Da die Entfernung zwischen Paris und Französisch-Guyana (in einer geraden Linie durch die Erdwölbung hindurch) ebenso bekannt war wie die Größe der Parallaxe, berechneten die Astronomen sowohl den Abstand zwischen dem Mars und der Erde als auch die Entfernung zwischen anderen Körpern im Sonnensystem. Die von Cassini auf diese Weise bestimmten Entfernungen lagen um etwa 7 Prozent zu niedrig, aber für einen ersten Versuch waren es exzellente Ergebnisse, die mit der Zeit natürlich noch verbessert wurden. Heute wissen wir, daß die Sonne nicht weniger als 150 Millionen Kilometer von der Erde entfernt ist, etwa 400mal so weit wie der Mond. Damit die Sonne trotz ihrer gewaltigen Entfernung so groß am Himmel erscheint, wie sie es tut, muß sie einen Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern haben, was dem 109fa chen Erd durchmesser entspricht – fürwahr eine riesige Welt. Dies ließ die Vorstellung, daß sich die Erde um die riesige Sonne drehe und nicht umgekehrt, um so vernünftiger erscheinen.

Zudem zeigten die Messungen Cassinis (mit modernen Verbesserungen), daß der Saturn – damals der fernste bekannte Planet – 1427 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt war; das war 9,5mal weiter als die Entfernung zwischen Sonne und Erde. Der Abstand über die volle Ausdehnung der Saturnbahn um die Sonne betrug mehr als *2,8 Milliarden* Kilometer. So erhielten die Astronomen 1672 erstmals in der Geschichte eine Vorstellung von der Größe des Sonnensystems.

Bis zum 17. Jahrhundert hätte niemand auch nur im Traum daran gedacht, diese Frage zu stellen, da die Antwort so offensichtlich schien. Natürlich ist die Erde groß. Für die Menschen im Altertum war die Erde bei weitem das größte Objekt der materiellen Welt, denn all die anderen Körper wurden als kleine Dinge betrachtet, die am Himmel oder an der inneren Schale befestigt waren. Selbst als erstmals die Größe des Mondes bestimmt wurde, erwies sich dieser als deutlich kleiner als die Erde. Die vorherrschende Meinung damals war deshalb, daß kein Himmelskörper an die Größe der Erde heranreiche.

Nachdem Cassini zum erstenmal die Größenordnungen im Sonnensystem ermittelt hatte, war der Stolz der Menschen auf die Erde (zumindest was ihre bloße Größe angeht) erschüttert. Zweifellos handelte es sich bei der Erde im Vergleich zur Sonne wirklich um eine äußerst winzige Welt. Aber die Sonne ließ sich als Ausnahme betrachten. Schließlich ist sie der zentrale Körper, den alle Planeten umkreisen; sie muß also groß und eindrucksvoll sein. Die Frage war somit, wie die Erde im Vergleich zu den anderen Planeten des Sonnensystems abschneidet.

74. Was sind Sterne?

Ursprünglich hielt man die Sterne für das, wonach sie aussahen: kleine Flecken aus einem leuchtenden Material, die an einen festen Himmel geheftet waren. Dies war so lange vernünftig, wie man glaubte, das Universum sei relativ klein und der Himmel nicht allzu hoch. Sich die Sterne als kleine Flecken vorzustellen, wurde jedoch zunehmend schwieriger, als das Universum im Denken der Astronomen mit der Zeit immer größer wurde.

Nachdem Halley die Eigenbewegung der Sterne entdeckt hatte, war es klar, daß selbst die nächsten Sterne noch Milliarden von Kilometern entfernt sein müßten, wenn es innerhalb der Sternenkugel genug Platz für das riesige Sonnensystem geben sollte. Wie groß mußte ein Lichtfleck sein, damit er über eine Entfernung von vielen Milliarden Kilometern noch sichtbar war? Wenn wir darüber nachdenken, kommen wir zwangsläufig zu dem Schluß, daß die Sterne *sehr* große Objekte sein müssen.

Der erste, der dies 1440 erahnte, war der deutsche Gelehrte Nikolaus von Kues (1401–1464). Er glaubte, der Weltraum sei unendlich groß und die Steine seien über den gesamten Weltraum verstreut. Darüber hinaus war für ihn jeder Stern ein Objekt ähnlich unserer Sonne; und jeder von ihnen besäß Planeten, auf denen möglichst Leben existierte. Mit allem vertrat er erstaunlich moderne Ansichten, aber es war keine Spekulation, für die er keine Beweise erbringen konnte. Sobald Halley entdeckt hatte, daß sich die Sterne bewegten, kam man an Nikolaus von Kues' Vorstellungen offensichtlich nicht mehr vorbei: Halley fragte sich, ob Sirius, der hellste und damit zugleich der nächste Stern oder zumindest einer der nächsten Sterne am Himmel, nicht die gleiche Leuchtkraft

haben könnte wie die Sonne. Vielleicht erschien er nur deshalb als kleiner Lichtpunkt, weil er so weit von der Sonne entfernt war.

Wie weit müßte eine Sonne wie die unsere dann entfernt sein, damit sie nur so hell wie Sirius erschien? Halley rechnete diese Annahme durch und kam zu dem Ergebnis, wenn Sirius tatsächlich so hell wie unsere Sonne sei, müsse seine Entfernung von uns *19 Billionen Kilometer* betragen. Wohlgernekt, eine Billion sind *tausend Milliarden* oder eine Million Milliarden – 1 000 000 000 000.

Nach Halleys Berechnung war Sirius 1350 mal so weit von der Sonne entfernt wie der Saturn. Sterne, die schwächer als Sirius leuchten, müssen grundsätzlich noch weiter entfernt sein. Wieder erweiterte sich die Vorstellung vom Universum; seine Ausdehnung belief sich nun nicht mehr auf Millionen oder Milliarden, sondern auf Billionen Kilometer.

75. Wie weit sind die Sterne eigentlich entfernt?

Halley's Schätzung der Entfernung von Sirius basiert darauf, daß der Stern die gleiche Leuchtkraft besitzt wie die Sonne. Diese Annahme steht auf wackeligen Füßen. In Wirklichkeit könnte Sirius genauso gut schwächer oder heller leuchten als die Sonne. Wir brauchen also ein direkteres Verfahren, um die Entfernung eines Sterns zu bestimmen. Überlegen wir also, wie ein solches funktionieren könnte.

Die Entfernung des Mars wurde 1672 mit recht großer Genauigkeit bestimmt, indem man den Planeten von Paris und von Französisch-Guyana aus anpeilte und seine Parallaxe be-

rechnete. Doch selbst die nächsten Sterne sind mit ziemlicher Sicherheit zumindest mehrere hunderttausend Male so weit entfernt wie der Mars, was bedeutet, daß die Parallaxe der nächsten Sterne auch einige hundertausend Male kleiner wäre. Schon die Marsparallaxe war schwer genug zu messen, obwohl sie von Standorten in verschiedenen Hemisphären aus betrachtet wurde; die Bestimmung einer Sternparallaxe wäre vollends unmöglich.

Es könnte jedoch einen Ausweg aus diesem Dilemma geben. Die Erde kreist um die Sonne und bewegt sich innerhalb von sechs Monaten von einem Ende ihrer Umlaufbahn zum anderen – eine Entfernung von rund 300 Millionen Kilometern oder etwa der 23 500fache Erd durchmesser. Wenn ein Stern vom gleichen Standort aus zuerst am 1. Januar und dann am 1. Juli beobachtet wird, ist die Parallaxe 23 500mal so groß, wie wenn man sie nur von entgegengesetzten Punkten auf der Erdoberfläche aus beobachten würde.

Selbst unter solchen Bedingungen ist die Parallaxe eines Sterns sehr klein, bedeutend kleiner jedenfalls als diejenige, die von Cassini bestimmt wurde. Als Kopernikus seine Theorie erstmals vorstellte, wiesen in der Tat einige Astronomen darauf hin, daß die Sterne keine parallaktische Verschiebung zeigten. Die Erde könne daher gar nicht ihre Position verändern, sondern bleibe immer an derselben Stelle. Kopernikus begannete dem Einwand ganz richtig mit dem Argument, es gebe durchaus eine Parallaxe, nur seien die Sterne so weit entfernt, daß sie nicht mehr messbar sei. Ohne Teleskop trat dies gewiß zu.

Doch selbst wenn die Sterne wirklich ungeheuer und unterschiedlich weit entfernt wären, so konnten ihre Parallaxen im Prinzip bestimmt werden. Bis zum 19. Jahrhundert waren die Teleskope schließlich so weit verbessert, daß dies möglich wurde.

230

In den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts richtete der deutsche Astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) sein Teleskop (das beste, das je gebaut worden war) auf den recht schwach leuchtenden Stern 61 Cygni. Trotz seiner geringen Leuchtkraft wies er die größte damals bekannte Eigenbewegung auf, was Bessel zu der richtigen Annahme führte, daß er zumindest für einen Stern recht nahe sein mußte. Im Jahre 1838 erhielt er schließlich eine winzige Parallaxe und gab die Entfernung von 61 Cygni bekannt. Seine erste Schätzung lag ein wenig daneben, war aber für einen ersten Versuch hervorragend. Der Stern 61 Cygni befindet sich 105 Billionen Kilometer von der Erde entfernt.

Nur wenig später beobachteten zwei andere Astronomen ebenfalls die parallaktische Verschiebung eines Sterns. Dies war jedoch kein Zufall, denn wenn die Instrumente besser werden und manchmal sogar ein Umdenken einsetzt, kommt es oft vor, daß eine ganze Reihe verschiedener Wissenschaftler etwa zur selben Zeit die gleiche Leistung vollbringen: Zwei Monate nach der Ankündigung Bessels gab der britische Astronom Thomas Henderson (1798–1844) bekannt, daß der helle Stern Alpha Centauri etwa 42 Billionen Kilometer entfernt sei. Eigentlich hatte er seine Arbeit vor Bessel abgeschlossen, aber Bessel hatte seine Beobachtung als erster veröffentlicht, d. h. in schriftlicher Form mitgeteilt. Und die allgemeine Anerkennung erhielt nun einmal derjenige, der als erster an die Öffentlichkeit tritt.

Ein wenig später zeigte der deutsch-russische Astronom Friedrich G. W. von Struve (1793–1864), daß der helle Stern Wega (um die heutige Zahl zu nennen) 255 Billionen Kilometer entfernt war. Es stellte sich übrigens heraus, daß Alpha Centauri von uns aus gesehen der nächste Stern ist. Was Sirius betrifft, so ist er 82 Billionen Kilometer entfernt –

etwas mehr als viermal so weit, wie Halley geschätzte hatte. Der Grund, warum Halley sich getäuscht hatte, lag darin, daß er die Leuchtkraft von Sirius so hoch wie die der Sonne angesehen hatte – in Wirklichkeit ist diese aber sechzehnmal höher. Diese Sterne befinden sich alle recht nahe an der Erde. Die meisten Sterne sind aber so viel weiter entfernt, daß sich ihre Parallaxen nicht einmal mit den derzeit besten Instrumenten messen lassen.

76. Wie schnell breitet sich Licht aus?

Mit großen Zahlen umzugehen ist lästig; die vielen Nullen sind verwirrend. Solange es um die Größe des Sonnensystems geht, kann man noch mit Millionen oder auch ein paar Milliarden Kilometer auskommen. Doch wenn wir es mit Sternen zu tun haben und feststellen, daß Größenordnungen von mindestens Billiarden und noch häufiger Billiarden Kilometern gefragt sind, können wir nur noch die Hände über dem Kopf zusammen schlagen und uns fragen, was das Ganze eigentlich soll.

Das Problem ist, daß die Längeneinheit »Kilometer« definiert wurde, um die alltäglichen Strecken auf der Erde und nicht riesige astronomische Entfernungen zu messen. Um problemlos mit den Entfernung von Sternen arbeiten zu können, brauchen wir eine andere Maßeinheit, die sich des Lichts bedient.

Vorher müssen wir fragen, wie schnell sich Licht ausbreitet. Sie schalten in einer Ecke des Zimmers das Licht ein: Wie lange dauert es, bis das Licht die andere Zimmerecke erreicht hat und diese ebenfalls erhellt?

Jemand, der sich darüber noch keine Gedanken gemacht hat, könnte glauben, daß Licht breite sich augenblicklich bzw. mit unendlicher Geschwindigkeit aus. Wenn man das Licht anknipst, ist ja sofort der ganze Raum erleuchtet. Selbst wenn man in einem riesigen Stadion eine starke Lichtquelle einschaltet, wird alles sofort hell.

Doch *augenblicklich* und *unendlich* sind problematische Wörter. Es kann durchaus sein, daß sich Licht nicht sofort, sondern lediglich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne ausbreitet, die normalerweise nicht mehr meßbar ist. Vielleicht breitet sich Licht gar nicht mit unendlicher Geschwindigkeit aus, sondern nur so schnell, daß seine Geschwindigkeit unbegrenzt erscheint.

Diese Möglichkeit läßt sich am ehesten dadurch überprüfen, daß man versucht, Licht eine sehr lange Strecke zurücklegen zu lassen. Dann könnte die Zeitspanne meßbar sein, die das Licht für diese große Entfernung braucht. Der erste, der sich dieses Experiment ausdachte, war Galilei. Er und ein Helfer bestiegen in einer dunklen Nacht zwei nebeneinander liegende Berge, wobei jeder eine Laterne mit sich trug. Galilei zog den Schieber seiner Laterne zurück und gab einen Lichtstrahl frei. Wenn der Helfer das Licht sah, öffnete er den Schieber seiner eigenen Lampe und schickte damit einen Lichtstrahl zurück. Galilei kannte die Entfernung zwischen den Gipfeln; die Zeit, die zwischen dem Aussenden des Lichtsignals und der Sichtung des Signals seines Assistenten verging, war somit die Zeitspanne, die das Licht benötigte, um diese Strecke zweimal zurückzulegen – von einem Gipfel zum anderen und wieder zurück.

Eine kurze Verzögerung gab es ratsächlich. Ein Teil davon war auf die Zeit zurückzuführen, die das Licht brauchte, um sich fortzupflanzen, aber ein anderer Teil war durch die Reaktionszeit bedingt. Schließlich dauerte es eine winzige Zeitspanne,

etwas mehr als viermal so weit, wie Halley geschätzthatte. Der Grund, warum Halley sich getäuscht hatte, lag darin, daß er die Leuchtkraft von Sirius so hoch wie die der Sonne angesehen hatte – in Wirklichkeit ist diese aber sechzehnmal höher.

Diese Sterne befinden sich alle recht nahe an der Erde. Die meisten Sterne sind aber so viel weiter entfernt, daß sich ihre Parallaxen nicht einmal mit den derzeit besten Instrumenten messen lassen.

76. Wie schnell breitet sich Licht aus?

Mit großen Zahlen umzugehen ist lästig; die vielen Nullen sind verwirrend. Solange es um die Größe des Sonnensystems geht, kann man noch mit Millionen oder auch ein paar Milliarden Kilometer auskommen. Doch wenn wir es mit Sternen zu tun haben und feststellen, daß Größenordnungen von mindestens Billiarden und noch häufiger Billiarden Kilometern gefragt sind, können wir nur noch die Hände über dem Kopf zusammen schlagen und uns fragen, was das Ganze eigentlich soll.

Das Problem ist, daß die Längeneinheit »Kilometer« definiert wurde, um die alltäglichen Strecken auf der Erde und nicht riesige astronomische Entfernungen zu messen. Um problemlos mit den Entfernung von Sternen arbeiten zu können brauchen wir eine andere Maßeinheit, die sich des Lichts bedient.

Vorher müssen wir fragen, wie schnell sich Licht ausbreitet. Sie schalten in einer Ecke des Zimmers das Licht ein: Wie lange dauert es, bis das Licht die andere Zimmercke erreicht hat und diese ebenfalls erhellt?

Jemand, der sich darüber noch keine Gedanken gemacht hat, könnte glauben, das Licht breite sich augenblicklich bzw. mit unendlicher Geschwindigkeit aus. Wenn man das Licht anknipst, ist ja sofort der ganze Raum erleuchtet. Selbst wenn man in einem riesigen Stadion eine starke Lichtquelle einschaltet, wird alles sofort hell.

Doch *augenblicklich* und *unendlich* sind problematische Wörter. Es kann durchaus sein, daß sich Licht nicht sofort, sondern lediglich innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne ausbreitet, die normalerweise nicht mehr meßbar ist. Vielleicht breitet sich Licht gar nicht mit unendlicher Geschwindigkeit aus, sondern nur so schnell, daß seine Geschwindigkeit unbegrenzt erscheint.

Diese Möglichkeit läßt sich am ehesten dadurch überprüfen, daß man versucht, Licht eine sehr lange Strecke zurücklegen zu lassen. Dann könnte die Zeitspanne meßbar sein, die das Licht für diese große Entfernung braucht. Der erste, der sich dieses Experiment ausdachte, war Galilei. Er und ein Helfer bestiegen in einer dunklen Nacht zwei nebeneinander liegende Berge, wobei jeder eine Laterne mit sich trug. Galilei zog den Schieber seiner Laterne zurück und gab einen Lichtstrahl frei. Wenn der Helfer das Licht sah, öffnete er den Schieber seiner eigenen Lampe und schickte damit einen Lichtstrahl zurück. Galilei kannte die Entfernung zwischen den Gipfeln; die Zeit, die zwischen dem Aussenden des Lichtsignals und der Sichtung des Signals seines Assistenten verging, war somit die Zeitspanne, die das Licht benötigte, um diese Strecke zweimal zurückzulegen – von einem Gipfel zum anderen und wieder zurück.

Eine kurze Verzögerung gab es tatsächlich. Ein Teil davon war auf die Zeit zurückzuführen, die das Licht brauchte, um sich fortzupflanzen, aber ein anderer Teil war durch die Reaktionszeit bedingt. Schließlich dauerte es eine winzige Zeitspanne,

bis der Helfer das Signal wahrnahm und den Schieber seiner eigenen Lampe öffnete.

Galilei wiederholte dieses Experiment deshalb auf zwei Hügeln, die weiter voneinander entfernt waren. Die Reaktionszeit wurde die gleiche sein, so daß jede zusätzliche Zeitspanne zwischen dem ersten Signal und dem Zurücksenden ausschließlich auf die Zeit zurückzuführen wäre, die das Licht unterwegs brauchte. Er unternahm den Versuch und fand heraus, daß es *keine* zusätzliche Zeit dauerte; die Zeitspanne zwischen dem Signal und der Antwort war ausschließlich Reaktionszeit. Licht war zu schnell, als daß sich seine Geschwindigkeit auf diese Weise messen ließ.

Galilei erkannte die Notwendigkeit, zwei weiter auseinanderliegende Berggipfel zu finden, aber er wußte, daß dies nicht zu schaffen war. Wegen der Erdkrümmung war ein Berggipfel von einem anderen aus nicht mehr zu sehen, wenn sie sehr weit voneinander entfernt lagen. Außerdem konnte Galilei keine Lampe finden, die über eine sehr große Entfernung hinweg hell genug strahlte. Hätte er ein Gerät zur Messung extrem kurzer Zeitabschnitte zur Verfügung gehabt, so hätte er natürlich die Messung damit durchführen können, aber er besaß kein derartiges Gerät und gab deshalb auf. Fast ein halbes Jahrhundert später wurde das Problem dann fast durch Zufall gelöst. Der dänische Astronom Olaus Rømer (1644–1710) studierte die vier Jupitersatelliten. Dank der Pendeluhr konnte man die Zeit damals schon recht präzise messen; außerdem war bekannt, wie lange jeder Satellit für eine Umrundung des Jupiters brauchte. Jeder verschwand regelmäßig zu einem bestimmten Zeitpunkt hinter dem Jupiter und tauchte auf der anderen Seite wieder auf. Ganz regelmäßig ging dies aber nicht vonstatten. Ein halbes Jahr lang traten die Satellitenfinsternisse ein wenig früher und das andere halbe Jahr ein wenig später ein als »planmäßig«.

Im Durchschnitt glich sich das alles aus, aber zu bestimmten Zeiten erfolgten die Mondverfinsterungen nicht weniger als acht Minuten zu früh, während sie ein halbes Jahr später acht Minuten zu spät eintraten.

Rømer suchte nach einer Erklärung und erkannte, daß die Mondverfinsterungen aufgrund des Sonnenlichts zu sehen waren, das von Jupiter und seinen Satelliten reflektiert wurde und sich zur Erde fortpflanzte. Da Jupiter und die Erde um die Sonne kreisten, gab es Zeiten, in denen sich beide Planeten genau auf derselben Seite der Sonne befanden und das Licht den kürzest möglichen Weg vom Jupiter zur Erde nehmen konnte. Etwa 200 Tage später befanden sich Jupiter und die Erde auf entgegengesetzten Seiten der Sonne, so daß das Licht vom Jupiter erst dorther reisen mußte, wo die Erde gewesen wäre, wenn sie sich auf der gleichen Seite befunden hätte, und *anschließend* den gesamten Durchmesser der Erdumlaufbahn zu der Stelle zurückzulegen hatte, wo sich die Erde tatsächlich befand. Es dauerte sechzehn Minuten, bis das Licht den Durchmesser der Erdumlaufbahn hinter sich gebracht hatte, acht Minuten vom Jupiter bis zur Sonne und weitere acht Minuten bis zu der Stelle, an der sich die Erde auf der anderen Seite befand. Diese Strecke war natürlich viel länger als die Entfernung zwischen den beiden Berggipfeln, die Galilei verwendet hatte. Die zwei sehr fernen »Gipfel« Jupiter und Erde lagen in Sichtweite voneinander; das Licht war stark genug, um auf beiden gesehen zu werden, und die Entfernung veränderte sich in zeitlicher Hinsicht gleichbleibend. Es war Galileis Experiment im riesigen Maßstab, und diesmal funktionierte es.

Rømer gab sein Ergebnis 1676 bekannt. Er verfügte über keine vollkommen genaue Zahl für den Durchmesser der Erdumlaufbahn; seine Berechnung fiel daher ein wenig zu

niedrig aus, kam aber ungefähr hin. Zum ersten Mal wußte man mit Sicherheit, daß die Lichtgeschwindigkeit nicht unendlich war, aber viel höher als jede andere Geschwindigkeit, die man bisher gemessen hatte. Es wurden weitere Verfahren entwickelt, um die Lichtgeschwindigkeit noch präziser zu bestimmen; die heute allgemein anerkannte Zahl liegt etwas unter 299 800 km/s.

77. Was ist ein Lichtjahr?

Inwiefern hilft uns die Lichtgeschwindigkeit dabei, daß wir die Entfernungen von Sternen behan deln? Nehmen wir an, man würde herauszufinden versuchen, wie weit sich Licht innerhalb eines Jahres bewegt. In jeder Sekunde legt es 299 800 Kilometer zurück, und jede Minute hat 60 Sekunden, jede Stunde 60 Minuten, jeder Tag 24 Stunden und jedes Jahr knapp $365\frac{1}{4}$ Tage. Dies bedeutet, daß ein Jahr beinahe 31 557 000 Sekunden besitzt. Wenn wir die Entfernung, die das Licht in einer Sekunde zurücklegt, mit der Anzahl der Sekunden eines Jahres multiplizieren, stellen wir fest, daß das Licht in einem Jahr ungefähr 9,46 Billionen Kilometer zurücklegt. Diese Entfernung wird als *Lichtjahr* bezeichnet.

Der nächste Stern, Alpha Centauri, ist 4,4 Lichtjahre von uns entfernt, was heißt, daß Licht von uns zu Alpha Centauri oder von Alpha Centauri zu uns 4,4 Jahre unterwegs ist. Dies vermittelt eine Ahnung davon, wie weit die Sterne entfernt sind. Ein Lichtstrahl braucht $\frac{1}{60}$ Sekunde, um von New York nach San Francisco zu gelangen, etwas mehr als eine Achtel sekunde für eine Reise um die Welt und etwa 16 Minuten für

eine Durchquerung der Erdumlaufbahn, aber 4,4 Jahre, um den nächsten Stern zu erreichen. Sirius ist 8,6 Lichtjahre entfernt, 61 Cygni 11,2 und Wega 27 Lichtjahre; und sie gehören noch zu den nächsten Sternen. Obwohl Lichtjahre lange Strecken auf sehr anschauliche Weise zum Ausdruck bringen, werden sie von den Astronomen mittlerweile kaum noch verwendet; statt dessen benutzen sie für die Angabe von Entfernungen die Längeneinheit *Parsec*.

Jeder Kreis, darunter auch der riesige Kreis, den man sich um den Himmel gezogen vorstellen kann, ist in 360 Grad unterteilt, wobei jeder Grad wiederum 60 Bogenminuten und jede Bogenminute 60 Bogensekunden enthält. Jeder Kreis besteht damit aus 1 296 000 gleichen Bogensekunden.

Wenn man sich ein kleines σ am Himmel vorstellt, das nur 1 Bogensekunde breit ist, und sich anschließend eine ganze Reihe solcher σ s denkt, die so zu einer Linie aufgereiht sind, daß sie sich berühren und über den ganzen Himmel erstrecken, brauchte man 1 296 000 von ihnen, um einen vollständigen Kreis um den Himmel zu beschreiben. Jedes σ ist somit tatsächlich sehr klein.

Wie weit muß ein Stern entfernt sein, damit sich seine Parallaxe von seiner normalen Position aus zuerst in die eine und dann in die andere Richtung um 1 Bogensekunde verschiebt, während sich die Erde um die Sonne bewegt? Die Antwort lautet: 3,26 Lichtjahre, eine *Parallaxensekunde* oder kurz ein *Parsec*. Da sich kein Stern so nahe befindet, besitzt jeder bekannte Stern eine Parallaxe von weniger als einer Bogensekunde, wenn er von entgegengesetzten Seiten der Erdumlaufbahn aus betrachtet wird. Aus diesem Grund hat es auch so lange gedauert, bis man die Entfernung der Sterne messen konnte. Alpha Centauri ist 1,35, Sirius 2,65, 61 Cygni 3,44 und Wega 8,3 Parsec entfernt. 1 Parsec entspricht etwas mehr als 30 Billionen Kilometern.

Entfernung hinweg sehen kann. Man muß davon ausgehen, daß sie mehr Leuchtkraft als Galaxien besitzen, daß sie so hell wie 1 Billion Sonnen und bis zu 100mal heller als eine gewöhnliche Galaxis sind.

Zur selben Zeit entdeckte man, daß die von ihnen emittierte Strahlung veränderlich war; manchmal kam es innerhalb weniger Wochen zu beträchtlichen Schwankungen. Dies war ein Hinweis darauf, daß der Quasar einen Durchmesser von nicht mehr als ein paar Lichtwochen (vielleicht 1 Billion Kilometer) haben konnte, denn die für die Veränderung verantwortliche Kraft könnte sonst nicht schnell genug von einem Ende des Quasars zum anderen gelangen; *nichts* kann nämlich schneller übertragen werden als Licht. Wie kann ein so kleines Objekt so viel Energie freisetzen?

Die wahrscheinlichste Antwort geht auf das Jahr 1943 zurück, als der amerikanische Astronom Carl Seyfert eine Galaxis beobachtete, die einen sehr hellen und sehr kleinen Kern hatte. Inzwischen hat man auch andere Galaxien dieser Art entdeckt und bezeichnet die ganze Gruppe heute als *Seyfert-Galaxien*.

Die Kerne der Seyfert-Galaxien sind hochgradig aktiv, möglicherweise weil sie ungewöhnlich große Schwarze Löcher enthalten, die ihre Kerne vernichten. Vielleicht sind die Quasare besonders große und helle Seyfert-Galaxien, und alles, was wir auf die große Entfernung erkennen können, sind die winzigen, extrem aktiven und lichtstarken Kerne.

Neuere Untersuchungen haben tatsächlich gezeigt, daß die Umgebung der Quasare verschwommen ist; es könnte sich dabei um die Randbereiche einer Galaxis handeln. Da die Quasare zum größten Teil Milliarden Lichtjahre entfernt sind, müssen sie schon vor Milliarden Jahren in der Frühphase des Universums existiert haben. Als die Galaxien noch jung waren, kollabierte vielleicht eine große Anzahl von

ihnen im Zentrum zu Schwarzen Löchern. Mit der Zeit schluckten diese Schwarzen Löcher alles, was sie an sich reißen konnten; die Galaxien entwickelten sich danach zu ruhigeren und gesetzteren Objekten, so daß alle Quasare bis vor einer Milliarde Jahre »abkühlten« und zu existieren aufhörten.

Schon dadurch wird deutlich, daß das Universum in seiner Jugend ganz anders beschaffen war als heute und daß ein Entwicklungsprozeß stattgefunden hat. Dies steht im Widerspruch zu konkurrirenden Theorien, nach denen das Universum ohne wirklichen Anfang sei und im Laufe seiner unendlichen Vergangenheit im wesentlichen schon immer dasselbe Erscheinungsbild gehabt habe.

108. Können wir den Urknall sehen?

Gleichgültig, wie weit wir in die Ferne dringen, den Urknall selbst können wir nicht sehen. In den letzten Jahren wurde berichtet, daß Galaxien in einer Entfernung von vielleicht nicht weniger als 17 Milliarden Lichtjahren entdeckt worden sind (was ein Hinweis darauf wäre, daß das Universum mindestens 17 Milliarden Jahre alt ist) und daß sie so zahlreich sind, daß sie aufeinander zu liegen scheinen. Dies ist nicht überraschend, denn natürlich war das Universum vor 17 Milliarden Jahren viel kleiner als heute; die Galaxien müssen deshalb viel dichter beieinander gewesen sein.

Trotzdem können wir den Urknall selbst noch nicht sehen jedenfalls nicht mittels Licht. In der Frühzeit des Universums war der Weltraum nicht so durchlässig wie heute, sondern mit einem Nebel aus Energie angefüllt. Wohin wir auch schauen,

dürften wir daher auf einen undurchdringlichen Schleier stoßen.

Doch dies betrifft nur das Licht. Im Jahre 1949 erklärte Gamow (der den Ausdruck »Big Bang« einführte), wir sollten eigentlich immer noch ein schwaches, weit entferntes Echo des Urknalls spüren können. Als Folge dieser kosmischen Explosion sollten uns extrem kurzwellige Radiowellen (Mikrowellen) vom Urknall erreichen, die den Nebel durchdringen können. Gamow sagte sogar den genauen Energiegehalt dieser Mikrowellen voraus.

Wenn die Teleskope immer weiter in die Ferne und damit zugleich immer weiter in die Vergangenheit blicken, folgen sie einer Linie, die spiralförmig nach innen verläuft, während sich das Universum auf dem Weg in die Vergangenheit immer weiter zusammenzieht. Wohin wir auch blicken, die Spirale führt uns zum Zentrum und damit zugleich zum Urknall. Gamow sagte deshalb voraus, daß die Mikrowellen aus allen Teilen des Weltalls eintreffen und überall dieselbe Energie und Beschaffenheit aufweisen würden.

Im Jahre 1964 entdeckten der deutsch-amerikanische Physiker Arno Allan Penzias (geb. 1933) und der amerikanische Physiker Robert Woodrow Wilson (geb. 1936) diese gleichförmige kosmische Hintergrundstrahlung, die etwa so energiereich ist, wie Gamow vorausgesagt hatte. Dies wird als bislang bester Beweis dafür gewertet, daß der Urknall tatsächlich stattgefunden hat.

Die Astronomen versuchen nun, die Vorgänge zu ermitteln, die in den ersten Augenblicken des Urknalls abliefen. Sie gehen davon aus, daß der Blick in die Vergangenheit – wie bei einem Film, der rückwärts abgespielt wird – erkennen läßt, wie die Objekte des Universums aufeinander zu streben und zusammenprallen. Das Ergebnis muß das gleiche sein wie damals, als sich das Material des Sonnensystems bei der Entstehung der Sonne und der Planeten verdichtete. Die Temperatur

stieg und sorgte für einen heißen Erdmittelpunkt und einen noch heißeren Mittelpunkt der Sonne. Wenn wir bei unserem Blick zurück in die Vergangenheit sehen, wie sich die *ganzme* Materie des Universums verdichtet, sollte dabei ein viel heißerer Mittelpunkt des Universums entstehen. Mit anderen Worten: Am Anfang war das Universum ganz winzig und unglaublich heiß, und seitdem hat es sich ausgedehnt und abgekühlt.

Um die unglaublich hohen Temperaturen zu erklären, haben die Wissenschaftler über den Ablauf der Ereignisse in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall spekuliert: Sie zerbrechen sich den Kopf, was im ersten Millionstel einer billionstel Billionstelsekunde geschehen ist. Zum jetzigen Zeitpunkt sind dies alles nur Spekulationen; bis genügend Indizien vorhanden sind, die ihnen mehr Gewicht verleihen, können wir sie ruhig erst einmal auf sich beruhnen lassen.

109. Wie kam der Urknall zustande?

Bis vor nicht allzu langer Zeit glaubten die meisten Menschen in der abendländischen Tradition, Himmel und Erde seien vor etwa 6000 Jahren durch einen übernatürlichen Schöpfungsakt geschaffen worden. (Viele Menschen glauben noch immer daran, auch wenn sie dabei in ihrer geistigen Entwicklung auf einer Stufe mit denjenigen stehen, die die Erde nach wie vor für eine Scheibe halten.)

Die Wissenschaftler jedoch halten es heute im allgemeinen für bewiesen, daß das Sonnensystem vor 4,6 Milliarden Jahren durch natürliche Vorgänge aus einer Wolke aus Staub und Gas entstand; die Entstehung der Wolke läßt sich dagegen bereits

auf die Zeit unmittelbar nach dem Beginn des Universums vor vielleicht 15 Milliarden Jahren datieren.

Doch selbst wenn wir bis zum Urknall zurückgehen und uns vorstellen, daß die gesamte Materie und Energie des Universums in einer winzigen Kugel aus unglaublich dichtem und unglaublich heißem Material konzentriert war, die explodierte und so das Universum entstehen ließ – woher kam diese winzige Kugel? Wie entstand sie? Müssen wir in diesem Stadium von einem übernatürlichen Schöpfungsakt ausgehen?

Nicht unbedingt. In den 20er Jahren wurde mit der *Quantenmechanik* ein Wissenschaftszweig begründet, der viel zu kompliziert ist, um ihn hier zu behandeln. Die Quantenmechanik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die bis dahin rätselhafte Phänomene hinreichend erklären konnte und neue Phänomene voraussagte, die genau mit diesen Vorhersagen übereinstimmten.

Im Jahre 1980 beschäftigte sich der amerikanische Physiker Alan Guth mit dem Problem des Ursprungs des Urknalls unter dem Aspekt der Quantenmechanik. Man könnte sich das Universum vor dem Urknall als riesiges, grenzenloses Meer aus Nichts vorstellen, doch offenkundig ist dies nur eine ungenaue Beschreibung. Das Nichts enthält Energie und ist kein absolutes Vakuum, da ein Vakuum laut Definition gar nichts enthält. Das Präuniversum besaß aber Energie, und daß all seine anderen Eigenschaften denen eines Vakuums ähnlich, wird es als *falsches Vakuum* bezeichnet.

Aus diesem falschen Vakuum entsteht ein winziger Punkt Existenz, in dem sich die Energie aufgrund der blinden Kräfte willkürlicher Veränderungen gerade zufällig konzentriert hat. Tatsächlich kann man sich das grenzenlose falsche Vakuum als schäumende, blubbernde Masse vorstellen, die hier und da ein wenig Existenz erzeugt, gerade so, wie eine

Meereswelle Schaum bildet. Einige dieser Stückchen verschwinden sofort wieder und sinken in das falsche Vakuum zurück. Andere werden dagegen groß genug oder sind unter solchen Bedingungen entstanden, daß sie sich blitzartig zu einem Universum ausdehnen: Wir leben in solch einer Erfolgkreichen Blase.

Dieses Modell birgt jedoch viele Probleme in sich. Die Wissenschaftler sind deshalb noch immer bemüht, es zu rechtfertigen und die Probleme zu lösen. Wenn sie es schaffen sollten, werden wir dann eine genauere Vorstellung von der Entstehung des Universums haben? Selbst wenn eine Version von Guths Theorie stimmt, können wir natürlich einen Schritt weiter zurückgehen und fragen, woher die Energie des falschen Vakuums ursprünglich gekommen war. Hierauf gibt es keine Antwort, aber auch die Annahme, daß es an diesem Punkt einen übernatürlichen Schöpfungsakt gegeben habe, hilft nicht weiter, denn dann könnten wir noch einen Schritt zurückgehen und danach fragen, wo das übernatürliche Wesen seinen Ursprung hatte. Die Antwort auf eine solche Frage ist normalerweise ein entrüstetes »Es ist nirgendwoher gekommen. Es hat schon immer existiert.« Leicht vorstellbar ist das nicht, und man könnte genausogut behaupten, daß die Energie des falschen Vakuums schon immer existiert hat.

ASIMOV

ISAC

WELTALL

NEU
GRENZEN

ohne Grenzen



ein fester Schutzschild wäre*, der an allen Seiten bis zur Erde herunterreichte, wie es ja auch tatsächlich den Anschein hat. In diesem Fall könnte man sich das gesamte Universum als eine Art Käseglocke vorstellen, deren gewölbter Deckel als Himmel diente, während Meer und Festland den flachen Boden darstellten, auf dem sich der Mensch und alle anderen Lebewesen tummelten.

Wie möchte wohl Form und Größe eines solchen »Gehäuse-Universums« beschaffen sein?

Für viele war es eine rechteckige Platte. Es ist ein interessanter Zufall der Geschichte und Geographie, daß die ersten Zivilisationen am Nil, Euphrat und Tigris und am Indus in ostwestlicher Richtung weniger feste Grenzen haben als in nordöstlicher. Außerdem erstreckt sich das Mittelmeer von Osten nach Westen. Daher bezogen sich die ungenauen geographischen Vorstellungen der frühen Zivilisationen auch eher auf die Ostwestrichtung, als auf die nordöstliche. So erschien es auch logisch, sich dieses »Gehäuse-Universum« in ostwestlicher Richtung länger als in nordöstlicher vorzustellen.

Die Griechen allerdings haben, wie es scheint, eine strengere Auffassung von geometrischen Proportionen und Symmetrie gehabt. Sie neigten dazu, sich die Erde als eine runde Scheibe vorzustellen, in deren Zentrum natürlich Griechenland lag. Diese flache Scheibe bestand zum größten Teil aus Land, von einem schmalen Wasserband umgeben (dem »Okeanos-Fluß«), von dem aus sich das Mittelmeer gegen die Mitte zu erstreckte.

Um 500 v. Chr. etwa schätzte Hekataios von Milet (Geburts- und Sterbetag unbekannt), der erste wissenschaftliche Geograph der Griechen, den Durchmesser dieser runden Scheibe auf höchstens 8000 Kilometer. Danach betrüge die Größe der flachen Erde 52 000 000 Quadratkilometer. Eine solche Zahl muß den Zeitgenossen ungeheuer groß vorgekommen sein, tatsächlich aber stellt sie nur ein Zehntel der wirklichen Erdoberfläche dar.

Wie aber konnte sich dieses »Gehäuse-Universum«, ganz gleich wie groß es war und welche Form es hatte, an seinem Platz halten? Bei der Vorstellung einer flachen Erde, von der hier die Rede ist, bedeutet »unten« eine ganz bestimmte Richtung, und alles, was

* Der biblische Ausdruck »Firmament« beruht auf dem primitiven Glauben, daß der Himmel ein Festkörper sei.

schwer oder irdisch ist, fällt »hinunter«. Warum fällt die Erde selbst nicht hinunter?

Mank kann sich vorstellen, daß sich das Material der flachen Erde, das Land, auf dem wir stehen, nach unten zu immer weiter fortsetzt. Wenn das der Fall ist, steht man indessen erneut der Unendlichkeit gegenüber. Um dem vorzubeugen, kann man statt dessen annehmen, daß die Erde auf irgend etwas ruht. Dem Weltbild der Hindus gemäß steht sie auf vier Säulen.

Aber damit ist das Problem noch nicht gelöst. Denn: Worauf stehen wiederum die vier Säulen? Auf Elefanten? Auf riesenhaften Schildkröte! Und die Schildkröte? Sie schwimmt in einem ungeheuren Ozean! Und dieser Ozean —

Kurzum, durch die Annahme einer flachen Erde, wie naheliegend und logisch sie auch immer sein mag, wird man unvermeidlich in philosophische Schwierigkeiten verstrickt.

Die kugelförmige Erde

Tatsächlich war die Vorstellung einer flachen Erde gar nicht so widerspruchsfrei — sobald man seine Augen nur richtig benutzte. Wenn die Erde nämlich wirklich flach war, mußte man von allen Punkten aus immer die gleichen Sterne am Himmel sehen — mit einigen geringfügigen Unterschieden vielleicht, die durch perspektivische Verkürzungen hervorgerufen wurden. Reisende jedoch, die sich nach Norden bewegten, konnten leicht beobachten, daß einige Sterne hinter dem südlichen Horizont verschwanden, während am nördlichen Horizont neue Sterne auftauchten. Wenn man nach Süden reiste, war es umgekehrt. Das konnte sehr einfach durch die Annahme erklärt werden, die Erde sei in nordöstlicher Richtung gekrümmt. — Ob es in ostwestlicher Richtung einen entsprechenden Effekt gab, war nicht klar zu erkennen, da sich der gesamte Himmel in ostwestlicher Richtung fortbewegt, und zwar vollzieht er alle vierundzwanzig Stunden eine vollständige Drehung.

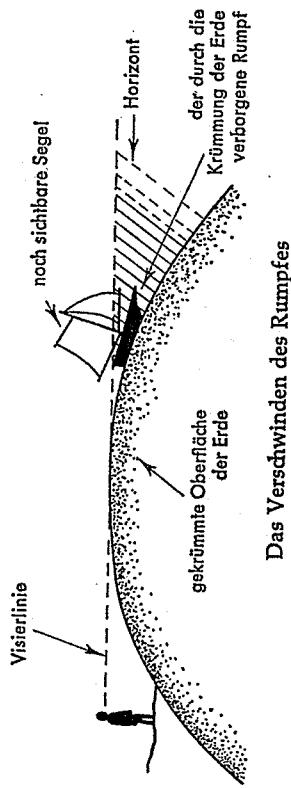
Der griechische Philosoph Anaximander von Milet (611—546 v. Chr.) äußerte daher die Vermutung, daß die Menschen auf der Ober-

fläche eines Zylinders lebten, deren Krümmung von Norden nach Süden verläuft. Soviel wir wissen, war er der erste, der die Erdoberfläche nicht für flach hielt; das war etwa um das Jahr 550 v. Chr. Gleichwohl war das Bild einer zylindrischen Erde ebenfalls ungünstig. Die Erfahrung der Menschen, die an der Meeresküste lebten, lehrte, daß Schiffe, die hinaus aufs Meer fuhren, keineswegs immer kleiner und kleiner wurden, bis sie zu einem unendlich winzigen Punkt zusammenschrumpften, wie man es erwarten konnte, falls die Erde flach war. Statt dessen verschwanden sie, während sie noch deutlich wahrnehmbar, also noch nicht zum Punkt zusammengezrumpft waren. Zuerst entzog sich der Rumpf der Sicht — es sah aus, als wäre ein flacher Hügel zwischen Schiff und Beobachter. Genau das war der Eindruck, den man bei gekrümmter Erdoberfläche erhalten mußte. Auffälligerweise verschwanden die Schiffe stets auf die gleiche Art und Weise, in welcher Richtung sie sich auch entfernten. Deshalb mußte die Erde nicht nur in nord-südlicher, sondern nach allen Richtungen hin in gleicher Weise gekrümmt sein. Der einzige Körper, dessen Oberfläche nach allen Richtungen gleiche Krümmung aufweist, ist aber die Kugel.

Die griechischen Astronomen glaubten auch eine Verfinsterung des Mondes am besten erklären zu können, indem sie annahmen, daß sich Mond und Sonne auf entgegengesetzten Seiten der Erde befänden und daß der durch die Sonne geworfene Schatten der Erde auf den Mond fiel und ihn verfinsterte. Dieser Schatten hatte stets kreisförmige Begrenzung, unabhängig davon, wie Mond und Sonne im Hinblick auf die Erde standen. Der einzige Körper aber, der in alle Richtungen einen kreisförmigen Schatten wirft, ist eine Kugel. Eine genaue Beobachtung zeigte also, daß die Erdoberfläche nicht flach, sondern kugelförmig war. Beim flüchtigen Hinsehen erschien sie nur deshalb eben, weil sie so groß ist, daß der beschrankte, dem Auge sichtbare Teil eine zu geringe Krümmung hat, um wahrgenommen zu werden.

Soweit wir informiert sind, hat der griechische Philosoph Philolaos von Kroton (geb. um 480 v. Chr.) als erster um 450 v. Chr. den Gedanken einer kugelförmigen Erde geäußert.

Diese Anschaugung löst auch das Problem ihres Endes. Eine Kugeloberfläche ist endlich, aber unbegrenzt. Etwa ein Jahrhundert nach Philolaos faßte der griechische Phi-



Das Verschwinden des Rumpfes

losoph Aristoteles von Stagira (384—322 v. Chr.) zusammen, welche Folgen sich aus der Annahme einer kugelförmigen Erde ergaben.

»Unten« durfte nicht mehr als absolute, sondern nur noch als relative Richtung gelten. Gäbe es eine absolute Richtung, wie wir manchmal anzunehmen scheinen, wenn wir auf unsere Füße deuten, dann müßte die gesamte kugelförmige Erde ständig nach unten fallen — oder zumindest so lange, bis sie auf einen festen Untergrund zu liegen kommt, der sich bis ins Unendliche nach unten fortsetzt. Falls wir aber »unten« als die Richtung definieren, die zum Zentrum der Erde führt, dann meinen wir, wenn wir sagen, die Dinge »fallen hinunter«, daß sie sich gegen das Zentrum der Erde zu bewegen. Deshalb fällt nichts von der Erde herunter, und die Menschen auf der anderen Seite des Globus haben nicht das Gefühl, auf dem Kopf zu stehen.

Die Erde selbst kann nicht fallen, denn jeder Teil hat sich bereits so weit wie möglich gegen das Zentrum hinbewegt. Deshalb muß die Erde eine Kugel sein; nur bei der Kugel haben alle Teile den kürzesten Abstand vom Mittelpunkt.

Um 350 v. Chr. galt es also als sicher, daß die Erde die Form einer Kugel habe, und in der westlichen Welt hat kein Gebildeter mehr daran gezweifelt.

Diese Ansicht war so befriedigend und widerspruchsfrei, daß sie akzeptiert wurde, obgleich ein direkter Beweis dafür nicht erbracht werden konnte. Erst achtzehn Jahrhunderte später, 1522 n. Chr., erwies sich, daß die Erde tatsächlich rund ist, als nämlich ein Schiff, das einer Expedition des Portugiesen Fernão de Magalhães (1480 bis 1521, auch Magellan genannt) angehörte, rund um die Erde segelte, bis es wieder in seinen Heimathafen zurückkehrte.

Heute ist die kugelförmige Erde für uns eine Tatsache, die uns

die eigenen Augen bestätigt haben. Ende der vierziger Jahre flogen Raketen hoch genug, um Bilder von großen Teilen der Erdoberfläche aufzunehmen, denen die kugelförmige Krümmung deutlich anzusehen war*.

Die Größe der Erde

Nachdem feststeht, daß die Erde kugelförmige Gestalt hat, gewinnt die Frage nach ihrer Größe mehr Bedeutung als je zuvor. Es wäre schwierig, die Größe einer begrenzten flachen Erde festzustellen, ohne sie von einem Ende zum anderen abzunessen. Bei einer kugelförmigen Erde jedoch treten Erscheinungen auf, die von der Größe der Kugel abhängig sind.

Wenn die Erdkugel beispielsweise außerdentlich groß wäre, dann wären die von der Kugelform hervorgerufenen Phänomene zu undeutlich, um leicht entdeckt zu werden. Der Anblick der Sterne würde sich nicht wahrnehmbar verändern, wenn man ein paar hundert Kilometer nach Norden oder Süden reist, Schiffe würden nicht zuerst mit dem Rumpf verschwinden, während man sie noch mit bloßem Auge erkennen kann; der Rand des Erdschattens auf dem Mond würde gerade wirken, denn seine Krümmung wäre zu gering, um bemerkt zu werden.

Die einfache Tatsache also, daß die Wirkungen der Kugelform bemerkbar waren, bedeutete nicht nur, daß die Erde eine Kugel, sondern auch, daß ihre Ausdehnung begrenzt ist — sie kann groß sein, aber nicht allzu groß.

Wie aber sollte man die Größe messen? Griechische Geographen vermochten eine untere Grenze zu setzen. Schon um 250 v. Chr. wußten sie aus Erfahrung, daß es gegen Westen zu hinter der Straße von Gibraltar Land gab und daß bis zum Land im Osten, bis Indien, eine Entfernung von etwa 9000 Kilometern zu überwinden war — weitaus mehr also, als Hekataios zwei und ein halbes Jahrhundert

zuvor noch großzügig geschätzthatte. Über diese Entfernung hinweg hatte sich der Erdumfang noch nicht wieder zu einem Kreis geschlossen, so daß der Gesamtumfang mehr als 9000 Kilometer betragen mußte; aber um wieviel mehr, konnte man nicht sagen.

Der erste, der eine auf Beobachtung beruhende Antwort vorstellte, war der griechische Philosoph Eratosthenes von Kyrene (276–196 v. Chr.). Er wußte, daß die Sonne zur Zeit der Sonnenwende, am 21. Juni, wenn sie ihren höchsten Stand erreichte, in der Stadt Syene in Ägypten, dem heutigen Assuan, direkt im Zenit stand. Das wurde durch die Tatsache belegt, daß ein Stock, den man senkrecht in den Boden steckte, keinen Schatten warf. Wenn man aber zur gleichen Zeit in Alexandria, 800 Kilometer nördlich von Syene, einen Stock in den Boden steckte, so hatte dieser einen kurzen Schatten. Er zeigte an, daß dort die Mittagssonne etwas über 7 Grad südlich des Zenits stand.

Wäre die Erde flach, müßte die Sonne, falls sie unendlich weit entfernt war, über Syene und Alexandria gleichzeitig genau senkrecht stehen. Daß sie dies nicht tat, war wieder ein Beweis dafür, daß die Erdoberfläche zwischen beiden Städten gekrümmt war. Der Stab im Boden der einen Stadt zeigte nicht in die gleiche Richtung wie der in der anderen. Der eine war direkt auf die Sonne gerichtet, der andere nicht.

Je größer die Krümmung, um so größer der Richtungsunterschied zwischen den Stäben, und um so größer der Unterschied ihrer Schattenlänge. Eratosthenes überprüfte seine Berechnungen sehr sorgfältig mit Hilfe der Geometrie und kam schließlich zu dem Ergebnis: Wenn ein Unterschied von etwas über 7 Grad 800 Kilometern entspricht, dann entsprechen 360 Grad (der vollständige Umfang eines Kreises) ungefähr 40 000 Kilometern.

Wenn der Umfang einer Kugel bekannt ist, dann weiß man auch, wie groß ihr Durchmesser ist. Der Durchmesser ist gleich dem Umfang geteilt durch π (»pi«), eine Zahl von etwa 3,14. Eratosthenes schloß daher, daß die Erde bei einem Umfang von etwa 40 000 einem Durchmesser von etwa 13 000 Kilometern hat.

Die Oberfläche einer solchen Kugel beträgt ungefähr 520 000 000 Quadratkilometer, das ist wenigstens sechsmal so viel wie die größte in älteren Zeiten angenommene Ausdehnung der bekannten Welt. Offenbar war Eratosthenes' Kugel ein bißchen zu groß für die

* Um genau zu sein: Die Erde ist nicht exakt eine Kugel, aber die Abweichung davon ist zu gering, als daß man sie aus großer Entfernung mit dem Auge wahrnehmen könnte. Vom Weltraum aus gesehen wirkt die Erde genau wie eine Kugel.

die eigenen Augen bestätigt haben. Ende der vierziger Jahre flogen Raketen hoch genug, um Bilder von großen Teilen der Erdoberfläche aufzunehmen, denen die kugelförmige Krümmung deutlich anzusehen war*.

Die Größe der Erde

Nachdem feststeht, daß die Erde kugelförmige Gestalt hat, gewinnt die Frage nach ihrer Größe mehr Bedeutung als je zuvor. Es wäre schwierig, die Größe einer begrenzten flachen Erde festzustellen, ohne sie von einem Ende zum anderen abzumessen. Bei einer kugelförmigen Erde jedoch treten Erscheinungen auf, die von der Größe der Kugel abhängig sind.

Wenn die Erdkugel beispielsweise außerdentlich groß wäre, dann wären die von der Kugelform hervorgerufenen Phänomene zu undeutlich, um leicht entdeckt zu werden. Der Anblick der Sterne würde sich nicht wahrnehmbar verändern, wenn man ein paar hundert Kilometer nach Norden oder Süden reist, Schiffe würden nicht zuerst mit dem Rumpf verschwinden, während man sie noch mit bloßem Auge erkennen kann; der Rand des Erdschattens auf dem Mond würde gerade wirken, denn seine Krümmung wäre zu gering, um bemerkt zu werden.

Die einfache Tatsache also, daß die Wirkungen der Kugelform bemerkbar waren, bedeutete nicht nur, daß die Erde eine Kugel, sondern auch, daß ihre Ausdehnung begrenzt ist — sie kann groß sein, aber nicht allzu groß.

Wie aber sollte man die Größe messen? Griechische Geographen vermochten eine untere Grenze zu setzen. Schon um 250 v. Chr. wußten sie aus Erfahrung, daß es gegen Westen zu hinter der Straße von Gibraltar Land gab und daß bis zum Land im Osten, bis Indien, eine Entfernung von etwa 9000 Kilometern zu überwinden war — weitaus mehr also, als Hekataios zwei und ein halbes Jahrhundert

* Um genau zu sein: Die Erde ist nicht exakt eine Kugel, aber die Abweichung davon ist zu gering, als daß man sie aus großer Entfernung mit dem Auge wahrnehmen könnte. Vom Weltraum aus gesehen wirkt die Erde genau wie eine Kugel.

zuvor noch großzügig geschätzthatte. Über diese Entfernung hinweg hatte sich der Erdumfang noch nicht wieder zu einem Kreis geschlossen, so daß der Gesamtumfang mehr als 9000 Kilometer betragen mußte; aber um wieviel mehr, konnte man nicht sagen.

Der erste, der eine auf Beobachtung beruhende Antwort vorstellte, war der griechische Philosoph Eratosthenes von Kyrene (276–196 v. Chr.). Er wußte, daß die Sonne zur Zeit der Sonnenwende, am 21. Juni, wenn sie ihren höchsten Stand erreichte, in der Stadt Syene in Ägypten, dem heutigen Assuan, direkt im Zenit stand. Das wurde durch die Tatsache belegt, daß ein Stock, den man senkrecht in den Boden steckte, keinen Schatten warf. Wenn man aber zur gleichen Zeit in Alexandria, 800 Kilometer nördlich von Syene, einen Stock in den Boden steckte, so hatte dieser einen kurzen Schatten. Er zeigte an, daß dort die Mittagssonne etwas über 7 Grad südlich des Zenits stand.

Wäre die Erde flach, müßte die Sonne, falls sie unendlich weit entfernt war, über Syene und Alexandria gleichzeitig genau senkrecht stehen. Daß sie dies nicht tat, war wieder ein Beweis dafür, daß die Erdoberfläche zwischen beiden Städten gekrümmt war. Der Stab im Boden der einen Stadt zeigte nicht in die gleiche Richtung wie der in der anderen. Der eine war direkt auf die Sonne gerichtet, der andere nicht.

Je größer die Krümmung, um so größer der Richtungsunterschied zwischen den Stäben, und um so größer der Unterschied ihrer Schattentlänge. Eratosthenes überprüfte seine Berechnungen sehr sorgfältig mit Hilfe der Geometrie und kam schließlich zu dem Ergebnis: Wenn ein Unterschied von etwas über 7 Grad 800 Kilometern entspricht, dann entsprechen 360 Grad (der vollständige Umfang eines Kreises) ungefähr 40 000 Kilometern.

Wenn der Umfang einer Kugel bekannt ist, dann weiß man auch, wie groß ihr Durchmesser ist. Der Durchmesser ist gleich dem Umfang geteilt durch π (»pi«), eine Zahl von etwa 3,14. Eratosthenes schloß daher, daß die Erde bei einem Umfang von etwa 40 000 einem Durchmesser von etwa 13 000 Kilometern hat.

Die Oberfläche einer solchen Kugel beträgt ungefähr 520 000 000 Quadratkilometer, das ist wenigstens sechsmal so viel wie die größte in älteren Zeiten angenommene Ausdehnung der bekannten Welt. Offenbar war Eratosthenes' Kugel ein bißchen zu groß für die

Vorstellungen der Griechen, und als dann später Astronomen seine Rechnung wiederholten und auf kleinere Zahlenwerte kamen (29 000 Kilometer für den Umfang, 10 100 Kilometer für den Durchmesser und für die Oberfläche 260 000 000 Quadratkilometer), bediente man sich lieber dieser Zahlen. Diese kleineren Werte behaupteten sich auch noch während des Mittelalters. Kolumbus stützte sich darauf, als er versuchte, gegen Westen zu segeln, um von Spanien nach Asien zu gelangen. Dieser Weg wäre dann kürzer gewesen als jener nach Osten, was aber tatsächlich nicht der Fall ist. Seine Reise wurde trotzdem zu einem Erfolg, weil er an der Stelle, an der er Asien vermutete, den amerikanischen Kontinent erreichte. Erst 1522, als das einzige übriggebliebene Schiff von Magellans Flotte zurückkehrte, stellte man die wahre Größe der Erde fest, und Eratosthenes war rehabilitiert.

Die neuesten Berechnungen setzen den Erdumfang am Äquator mit 40 076,5 Kilometer fest. Der Durchmesser der Erde variiert geringfügig nach verschiedenen Richtungen, da die Erde nicht genau Kugelform hat; seine durchschnittliche Länge beträgt 12 742,4 Kilometer. Ihre Oberfläche beträgt 509 903 550 Quadratkilometer.

Der Mond

Wenn das ganze Weltall nur aus der Erde bestände, hätten die Griechen das grundlegende Problem der Kosmologie bereits vor 2000 Jahren gelöst. Aber die Erde allein ist nur ein Teil des Weltalls, und das wußten die Griechen sehr wohl. Schließlich wölbte sich auch noch der Himmel darüber.

Solang man die Erde als eine Ebene ansieht, ist es möglich, sich den Himmel als eine feste Kuppel vorzustellen, die die flache Erde an allen Seiten umschließt. Diese Kuppel braucht nicht einmal sonderlich hoch zu sein. Schon eine Höhe von 16 Kilometern genügt beispielsweise, um die höchsten Berge und die Wolken zu überspannen.

Wenn die Erde jedoch eine Kugel ist, dann muß der Himmel eine zweite, noch größere Kugel darumherum sein — die »Himmelskugel«, die das Universum begrenzt —, und es wäre von größtem Interesse, ihre Ausmaße zu kennen.

Wenn man sich auf nichts anderes stützt, als auf zufällige Beobachtungen, könnte die Himmelskugel die Erdkugel wirklich umgeben — in einer Entfernung von 16 Kilometern über ihrer Oberfläche. Wenn der Durchmesser der Erde 12 800 Kilometer beträgt, dann mäße der des Himmels 12 832 Kilometer.

Aber wir wollen uns nicht mit zufälligen Beobachtungen begnügen, denn das taten die Griechen — ebenso wie die Babylonier und Ägypter vor ihnen — ganz bestimmt auch nicht.

Die Himmelskugel scheint sich in vierundzwanzig Stunden einmal um die Erde zu drehen und dabei die Sterne geschlossen mit sich zu

infolgedessen auf 10 900 Kilometer für den Umfang. Er ist erheblich kleiner als die Erde, aber immerhin von beachtlicher Größe.

Die Bestimmung der Entfernung des Mondes von der Erde bestätigte ein für allemal die Annahme, daß sich der Himmel dicht über der Erde befände. Für die griechischen Verhältnisse bewegte man sich damit schon in ganz gewaltigen Räumen. Selbst der nächste Himmelskörper (Abb. 1) war fast 400 000 Kilometer entfernt, und die anderen mußten noch weiter, vielleicht viel, viel weiter sein.

Konnte man noch weiter vordringen? Wie verhielt es sich beispielweise mit der Sonne?

Aristarch erkannte, daß sich Mond, Sonne und Erde an den Eckpunkten eines gleichschenkeligen Dreiecks befanden, wenn der Mond genau im ersten — oder letzten — Viertel stand. Wenn man den Winkel ausmaß, den Mond und Sonne von der Erde aus gesehen bildeten, dann konnte man mit Hilfe der Trigonometrie das Verhältnis der Entfernungen zum Mond und zur Sonne errechnen. War die Entfernung des Mondes bekannt, ließ sich auch jene zur Sonne errechnen.

Es war Pech für Aristarch, daß Winkelmessungen am Himmel ohne gute Instrumente schwierig sind; außerdem ist die genaue Zeitbestimmung des ersten Mondviertels alles andere als leicht. Die Theorie, mit der er arbeitete, war mathematisch einwandfrei, aber seine Messungen genügten nicht für einigermaßen genaue Ergebnisse. Aus seinen Überlegungen ging hervor, daß die Sonne zwanzigmal so weit entfernt war wie der Mond. Wenn der Mond 380 000 Kilometer von der Erde entfernt war, mußte demnach die Sonne etwas unter 8 000 000 Kilometer weit weg sein, was viel zu wenig ist — aber als weiterer Beweis für die unerwartete Größe des Universums diente.

Wir können also sagen, daß die alten Griechen gegen 150 v. Chr., nach vier Jahrhunderte währendem Studium der Astronomie, Form und Ausmaße der Erde sowie die Entfernung des Mondes recht genau festgelegt hatten, aber nicht viel weiter darüber hinaus gelangt waren. Sie konnten daraus schließen, daß das Weltall eine riesige Kugel wäre, die wenigstens mehrere Millionen Kilometer im Durchmesser maß. In die Mitte dieser Kugel setzten sie ein Erd-Mond-System mit Ausmaßen, die wir noch heute als richtig erkennen.

Die Sonne

1800 Jahre lang wußte die Menschheit über das Universum nicht mehr als Hipparch. Es schien keine Möglichkeit zu geben, außer der Entfernung des Mondes die irgendeines anderen Planeten zu bestimmen. Obwohl eine Reihe Vermutungen über die Entfernung der Sonne ausgesprochen wurden, hatte keine praktischen Wert.

Ein Grund dafür, daß nach Hipparch so lange kein Fortschritt erzielt wurde, lag in dem Modell des Planetensystems, das die Griechen entwickelt hatten. Hipparch und seine Nachfolger hielten die Erde für den Mittelpunkt des Universums. Der Mond und die anderen Planeten drehten sich — auf eine ziemlich komplizierte Art und Weise — um sie herum, und außen kreiste das Gewölbe mit den Sternen. Dieses System wurde der Nachwelt in allen Einzelheiten durch die Arbeiten eines späteren Astronomen erhalten, des Claudius Ptolemäus, der in Ägypten lebte und seine Arbeiten um 130 n. Chr. niederschrieb. Das »geozentrische System« (»Erde im Mittelpunkt«) wird ihm zu Ehren auch manchmal »ptolemaisches System« genannt.

Eine solche Anschauung ermöglichte es den Astronomen, die scheinbare Bewegung der Planeten gegen den Sternenhintergrund mit der für diese Zeit erforderlichen Genauigkeit zu errechnen. Sie lieferte jedoch kein Modell, das genau genug gewesen wäre, um zur Bestimmung von Entfernungen dienen zu können, die über jene zum Mond hinausgingen.

Nikolaus Kopernikus (1473—1543) legte dann den Grundstein für ein neues Himmelsmodell. In einem Buch, das im Jahre 1543 genau an seinem Todestag herauskam, stellte er die Behauptung auf, daß nicht die Erde, sondern die Sonne den Mittelpunkt des Universums bilde. Das »Planetensystem« war seiner Meinung nach in Wirklichkeit ein »Sonnensystem«.

Dieselbe Behauptung hatte Aristarch schon neunzehn Jahrhunderte früher ausgesprochen, aber damals war dieser Gedanke viel zu radikal gewesen, um anerkannt zu werden. Nach diesem »heliozentrischen System« — *«helios* ist das griechische Wort für Sonne — kreiste die Erde genauso um die Sonne wie die anderen Planeten, und die ganze große Masse aus festem Gestein unter des Menschen

Füßen flog dennach durch den Raum, ohne daß er davon auch nur das geringste merkte. Statt sieben gab es jetzt nur noch sechs Planeten: Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn und Erde. Die Sonne war kein Planet mehr, sondern ein bewegungsloses Zentrum. Auch der Mond war kein Planet wie die anderen, denn selbst im heliozentrischen System kreiste er um die Erde und nicht um die Sonne. Einen Körper, der einen Planeten umkreiste, nannte man einen »Satelliten«, und folglich war der Mond ein Satellit.

Das kopernikanische System begann sich langsam in den Köpfen der Astronomen festzusetzen, denn allmählich hatte sich herausgestellt, daß das geozentrische System viele Unzulänglichkeiten aufwies. Die mathematische Berechnung der Planetenbewegung nach dem alten System war schwierig, und die Ergebnisse genügten den sorgfältigen Beobachtungen der neuen Generation von Astronomen nicht.

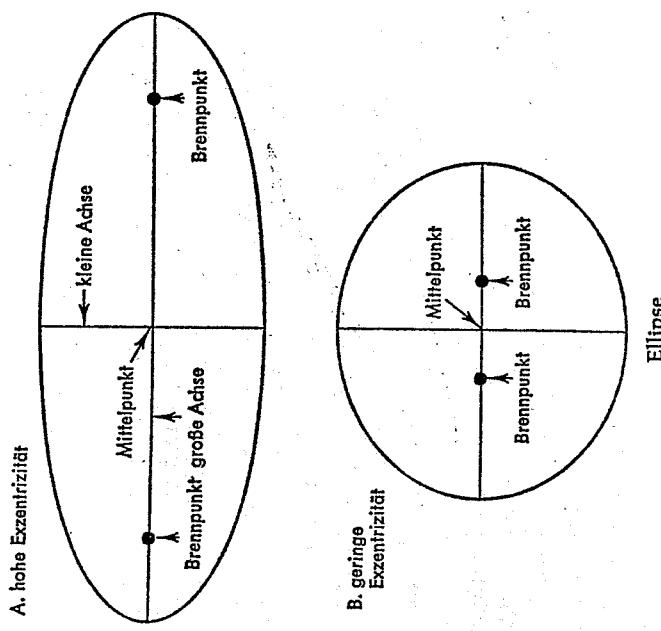
Das heliozentrische System erzielte weitaus bessere Resultate und vereinfachte außerdem die Berechnungen. Trotzdem war es noch nicht fehlerfrei, denn Kopernikus hielt die Planetenbahnen für vollkommene Kreise, was sich aber als nicht zutreffend herausstellte. Im Jahre 1609 endlich entstand ein richtiges Modell. Johannes Kepler (1571–1630) untersuchte die ausgezeichneten Ortsbestimmungen des Mars, die sein alter Lehrmeister, der dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601) gemacht hatte, und kam schließlich darauf, daß die einzige den Beobachtungen angemessene geometrische Figur eine Ellipse ist*.

Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, daß das für alle Planeten zutrifft, die sich um die Sonne bewegen, wie auch für den Mond bei seiner Bahn um die Erde. Die Bahnen sind stets Ellipsen, und der zentrale Körper befindet sich immer in einem Brennpunkt dieser Ellipse.

1619 stellte Kepler weiter fest, daß die Durchschnittsentfernung der Planeten von der Sonne in einem sehr einfachen mathematischen Verhältnis zu den Zeiten standen, die sie für eine Umrundung benötigten. Durch ihren Vergleich gelang es leicht, die relativen Entfernungen der einzelnen Planeten zu errechnen.

Nun war es möglich, ein genaues Bild des Sonnensystems zu entwerfen, in dem die Planetenbahnen in den richtigen Proportionen dargestellt wurden. Leider konnte man aufgrund des Vergleichs der Umlaufzeiten nur aussagen, daß ein Planet so und sovielmal so weit von der Sonne entfernt war wie ein anderer, aber wieviel Kilometer die Entfernung jeweils betrug, ließ sich dadurch nicht ermitteln. Man hatte zwar ein Modell, aber keinen Maßstab dafür. Trotzdem ließ sich an diesem Modell etwas von der Größe des Systems erkennen. Aus ihm folgte, daß der weitest entfernte Planet, der den Griechen – und auch Kepler – bekannt war, der Saturn, fast zehnmal so weit von der Sonne entfernt war wie die Erde.

Wenn man die Entfernung irgendeines Planeten von der Erde zu irgendinem Zeitpunkt hätte bestimmen können, hätte man den Maßstab gefunden. Dann ließ sich die Entfernung aller Planeten festlegen. Das Problem war nun also, wenigstens eine Planetenentfernung genau zu messen.



Wenn man die Entfernung irgendeines Planeten von der Erde zu irgendinem Zeitpunkt hätte bestimmen können, hätte man den Maßstab gefunden. Dann ließ sich die Entfernung aller Planeten festlegen. Das Problem war nun also, wenigstens eine Planetenentfernung genau zu messen.

fernt, daß sie ihre Lage nicht verändern, ganz gleich, von welchem Observatorium aus man sie betrachtet — und die Entfernung zwischen den Observatorien bekannt sind, dann ist es möglich, unter Verwendung der Trigonometrie die Entfernung des Mondes von der Erde zu errechnen.

Diese Methode ist aussichtsreich, denn die scheinbare Verlagerung des Mondes gegen den Sternenhintergrund, der die Lageveränderung des Beobachters zugrundeliegt, ist ziemlich groß. Die Astronomen haben einen Fall als Norm zugrundegelegt, nämlich den, in dem ein Beobachter den Mond am Horizont sieht, ein anderer ihn direkt über sich am Himmel. Die Grundlinie des Dreiecks entspricht dann genau dem Erdradius, und der Winkel zum Mond ist durch die »äquatoriale Horizontalparallaxe« gegeben und mißt 57,04 Winkelmünten oder 0,95 Winkelgrade*. Diese Verlagerung ist tatsächlich gut sichtbar, denn sie entspricht zweimal dem scheinbaren Vollmond-Durchmesser. Sie kann mit genügender Genauigkeit bestimmt werden, um einen guten Wert für die Mondentfernung zu ergeben.

Die mit Hilfe der Parallaxe errechnete Entfernung stimmt relativ gut mit der Entfernung überein, die man anhand der früher bekannten Berechnung aus der Krümmung des Erschattens während einer Mondfinsternis erhalten hatte. Leider waren die Planeten zu weit entfernt, als daß man durch den Wechsel von einem Observatorium zum anderen und unter den im Jahre 1600 gegebenen Umständen die Verlagerung gegen den Sternenhintergrund genau hätte messen können, denn diese war sehr gering.

Die Verwendung des Fernrohrs durch den italienischen Wissenschaftler Galileo Galilei (1564—1642) brachte dann 1608 eine Wende. Das Fernrohr, auch Teleskop genannt, hatte die Fähigkeit, kleine Parallaxen zu vergrößern. Verlagerungen, die zu gering waren, um mit bloßem Auge wahrgenommen zu werden, ließen sich mit dem Teleskop leicht vergrößern und messen.

1671 gelang die erste gute Bestimmung einer planetarischen Parallaxe mit Hilfe des Fernrohrs. Einer der beiden Beobachter war Jean Richter (1630—1696), ein französischer Astronom, der eine

* Ein Grad (1°) entspricht $\frac{1}{360}$ des Umfangs eines Kreises. Ein Grad ent-
hält sechzig Minuten ($60'$), eine Minute sechzig Sekunden ($60''$).

Um die Entfernung eines planetarischen Körpers zu bestimmen, kann man von einem Phänomen Gebrauch machen, das als Parallaxe bekannt ist. Diese Erscheinung läßt sich einfach demonstrieren, indem man einen Finger vor einem abwechslungsreichen Hintergrund in die Höhe hebt. Hält man Finger und Kopf still und fixiert den Finger zuerst mit einem, dann mit dem anderen Auge, so wird man bemerken, wie der Finger seine Stellung gegen den Hintergrund ändert, wenn man von einem Auge zum anderen übergeht. Bringt man den Finger dichter ans Auge, wird sein Sprung über den Hintergrund größer.

Das kommt daher, daß unsere Augen ein paar Zentimeter auseinanderliegen; die Linie vom Finger zu einem Auge bildet einen wahrnehmbaren Winkel mit der Linie vom Finger zum anderen Auge. Verlängert man die beiden Linien bis zum Hintergrund, treffen sie dort auf die beiden Punkte, an denen der Finger jeweils zu sein scheint. Je näher der Finger, um so größer der Winkel und um so größer also auch der Sprung. Wären die Augen noch weiter voneinander entfernt, so wäre auch der aus den beiden Linien gebildete Winkel größer und damit der Sprung des Fingers über den Hintergrund. (Normalerweise liegt der Hintergrund so weit entfernt, daß die Linien von irgendeinem Punkt darauf zu den beiden Augen einen so kleinen Winkel bilden, daß er nicht mehr merkbar ist. Der Hintergrund kann daher als unveränderlich betrachtet werden.)

Das gleiche Prinzip kann auf einen Himmelskörper angewandt werden. Der Mond ist natürlich zu weit entfernt, als daß der Wechsel von einem Auge zum anderen etwas ausmachte. Aber angenommen, der Mond wird gegen den Sternenhintergrund des Himmels von zwei Observatorien aus angepeilt, die mehrere hundert Kilometer voneinander entfernt sind. Das eine Observatorium beobachtet den Rand des Mondes vielleicht in einem bestimmten Winkelabstand von einem bestimmten Stern; das andere Observatorium wird im gleichen Augenblick einen anderen Winkelabstand zwischen derselben Stelle seines Randes zum selben Stern messen.

Wenn das Ausmaß der Lageverschiebung des Mondes gegen den Sternenhintergrund — vorausgesetzt, die Sterne sind so weit ent-

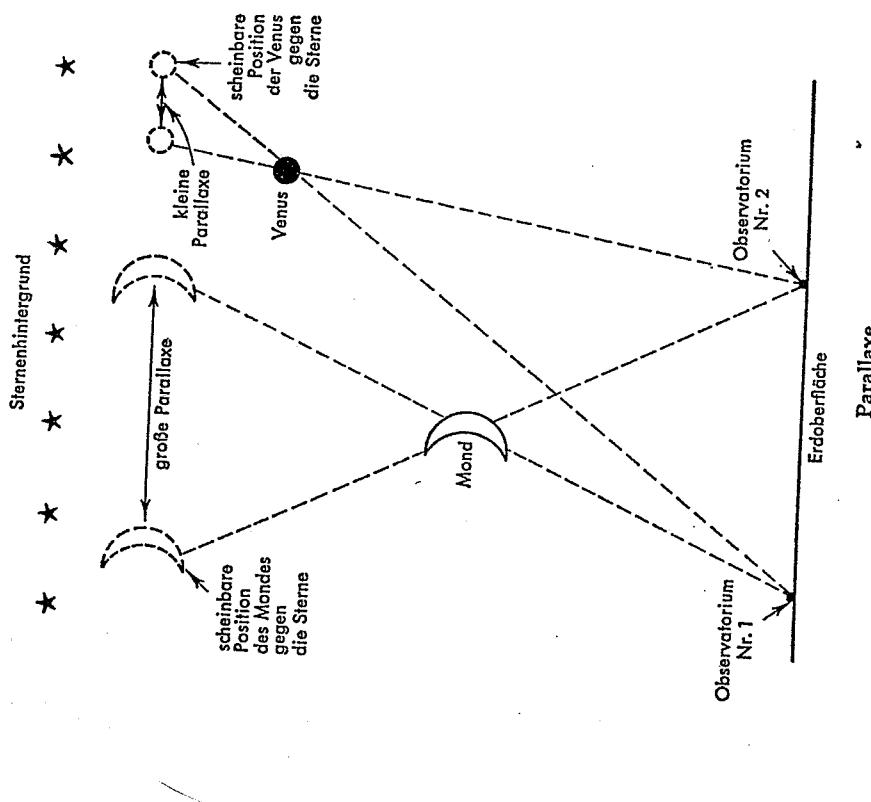
fähr neun Millionen Kilometer zu wenig, aber für einen ersten Versuch war es ein ganz ausgezeichnete Wert. Die Arbeit der beiden Wissenschaftler ist wohl als erster brauchbarer Beitrag zur Größenbestimmung des Sonnensystems anzusehen.*

Während der auf Cassini folgenden zwei Jahrhunderte gelangen noch genauere Bestimmungen von Planetenparallaxen. Einige verwenden die Venus zur Beobachtung, da sie gelegentlich genau zwischen Sonne und Erde hindurchgeht und als kleiner, dunkler, runder Körper zu sehen ist, der über die glühende Sonnenscheibe wandert. Solche »Durchgänge« fanden beispielsweise 1761 und 1769 statt. Wenn man den Durchgang von verschiedenen Observatorien aus sorgfältig beobachtet – die genaue Zeit, zu der die Venus scheinbar die Sonnenscheibe berührt, wann sie sich wieder löst, und die Dauer des Durchgangs –, dann wird man feststellen, daß alle Werte unterschiedlich sind. Aus diesen Unterschieden und den Entfernungswerten der Observatorien kann nun die Parallaxe der Venus errechnet werden, daraus ihre Entfernung und daraus letztlich die Entfernung der Sonne.

1835 benutzte der deutsche Astronom Johann Franz Encke (1791 bis 1865) die Daten von Venusdurchgängen und leitete daraus für die Sonne eine Entfernung von 153 540 000 Kilometern ab. Das war nur um wenig mehr als 3 Millionen Kilometer zu hoch gegriffen.

Die Schwierigkeit, noch genauere Daten zu erlangen, lag darin, daß Mars und Venus als winzige Kugeln im Teleskop erschienen, wodurch sich beim Fixieren des genauen Orts immer ein kleiner Spießraum ergab. Vor allem die Venus enttäuschte, denn sie besitzt eine dicke Atmosphäre, deren optische Wirkungen den genauen Moment des Kontaktes mit der Sonnenscheibe während eines Durchgangs noch unbedeutlicher machten.

* Die Sonnenparallaxe kann nicht unmittelbar mit jedem gewünschten Genauigkeitgrad festgestellt werden, denn dazu müßte ein Astronom mit einem festen Punkt auf der Oberfläche oder dem Rand der Sonne arbeiten. Auf ihrer gleißenden Oberfläche gibt es aber keine festen Bezugspunkte, und die winzige Verschiebung als Folge der Parallaxe – nur etwa $8,6''$ oder $\frac{1}{400}$ von der des Mondes – ist nicht zu erkennen. Die Planeten, die viel kleiner und dunkler sind, können in besonderen Positionen viel leichter und genauer beobachtet werden, so daß eine kleine Parallaxe leichter festzustellen ist. Auf diesem Umweg kann die Entfernung der Sonne viel besser errechnet werden als durch irgend eine direkte Bestimmung.



wissenschaftliche Expedition nach Französisch-Guayana leitete. Der andere war der italienisch-französische Astronom Giovanni Domenico Cassini (1625–1712), der in Paris blieb. Beide beobachteten Mars, so gut es ging, zur gleichen Zeit und zeichneten seine Stellung im Verhältnis zu nahegelegenen Sternen auf. Aus der beobachteten Ortsveränderung und aus der bekannten Entfernung Cayenne–Paris konnte die Entfernung zum Mars errechnet werden. Mit diesem Wert war auch der Maßstab für Keplers Modell geben, und alle anderen Entfernungen im Sonnensystem konnten nun bestimmt werden. Cassini errechnete beispielsweise die Entfernung Sonne–Erde mit 140 000 000 Kilometern. Das sind unge-

Dann gelang ein unerwarteter Durchbruch. Im Jahre 1801 entdeckte der italienische Astronom Giuseppe Piazzi (1746–1826) einen kleinen Planeten, der auf einer Bahn zwischen Mars und Jupiter kreiste. Er nannte ihn Ceres; sein Durchmesser war kleiner als 800 Kilometer. Im Laufe des Jahrhunderts wurden Hunderte weiterer, noch kleinerer Planeten gefunden, die alle zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter kreisen. Das sind die »Planeten« oder »Asteroiden«.

Der deutsche Astronom Karl Gustav Witt (1866–1946) entdeckte 1898 den Eros, einen Planetoiden, der aus dem Planetoidengürtel abwich. Ein Teil seiner Bahn reichte in die vom Mars hinein und näherte sich sogar der Erdbahn.

Nach den Vorausberechnungen mußte Eros bis zu zwei Dritteln der Entfernung Erde–Venus an die Erde herankommen. Diese Annäherung brachte eine ungewöhnlich große und leicht messbare Parallaxe mit sich. Außerdem war der Eros klein – schätzungsweise nur 24 Kilometer im Durchmesser – und besaß keine Atmosphäre, die seine Konturen verwischte, so daß er trotz der Nähe ein einfacher Lichtpunkt blieb. Das bedeutete die Möglichkeit zu einer äußerst genauen Bestimmung der Position.

Dieses Projekt wurde auf weltweiter Basis in Angriff genommen. Man studierte Tausende von Photographien und errechnete endlich aus Parallaxe und Standort des Eros für die Entfernung der Erde zur Sonne einen Wert von etwas weniger als 149 700 000 Kilometern. Allerdings ist das ein Durchschnittswert, da sich ja die Erde in einer Ellipsenbahn und nicht in einem Kreis um die Sonne (Perihel) bewegt. Bei der größten Annäherung der Erde an die Sonne (Aphel) beträgt die Entfernung 147 100 000 Kilometer; die weiteste Entfernung der Erde zur Sonne (Aphel) beträgt 152 300 000 Kilometer.

Die Größe des Sonnensystems

In den letzten Jahren ist man auf eine Möglichkeit zur Größenbestimmung des Sonnensystems gekommen, die noch genauer ist als die Parallaxenmethode. Man hat Techniken entwickelt, bei denen sehr kurze Radiowellen (»Mikrowellen«), wie man sie beim

Radar benutzt, in den Weltraum gesandt werden; sie prallen von einem Planeten, etwa von der Venus, ab; die Reflexionen werden wieder aufgefangen und untersucht. Die Geschwindigkeit, mit der sich Mikrowellen fortbewegen, ist genau bekannt, und die Zeitspanne zwischen Aussendung und Empfang kann gemessen werden. Die Entfernung, die der Mikrowellenstrahl auf seiner Hin- und Rückreise zurücklegt, also die Entfernung zur Venus zu einer bestimmten Zeit, kann so mit größerer Genauigkeit bestimmt werden als durch jede Berechnung mit Hilfe der Parallaxe.

1961 empfing man solche Mikrowellenreflexionen von der Venus. Die daraus gewonnenen Daten ergaben eine Durchschnittsentfernung der Erde zur Sonne von 149 660 000 Kilometern.

Mit Hilfe des Keplerschen Planetenmodells können die Entfernungen sämtlicher Planeten entweder von der Erde oder von der Sonne zu jeder beliebigen Zeit errechnet werden. Es erweist sich als bequemer, die Entfernung von der Sonne anzugeben, da sich diese zeitlich weniger stark verändert als die von der Erde.

Die Entfernung läßt sich auf vier verschiedene Arten, je nach dem Zweck der Untersuchung, ausdrücken.

Erstens kann man sie in Millionen von Kilometern ausdrücken. Außer in den angelsächsischen ist der Kilometer in allen zivilisierten Ländern die übliche Einheit zum Messen großer Entfernungen; der Kilometer ist auch überall auf der Erde die Einheit für die Wissenschaftler, sogar für jene der USA und Großbritanniens.

Zweitens kann man sie in Millionen von Meilen angeben. In den USA und Großbritannien sind Meilen die allgemein übliche Einheit zum Messen großer Entfernungen.

Drittens kann die Durchschnittsentfernung der Sonne von der Erde als »astronomische Einheit« (abgekürzt: AE) verwendet werden; damit vermeidet man Angaben von Millionen Kilometern oder Meilen. Man kann also Entfernungen in AE angeben, wobei 1 AE = 149 500 000 Kilometer oder 92 960 000 Meilen ist. Meistens genügt es, 1 AE mit 150 000 000 Kilometern anzunehmen.

Viertens kann man die Entfernung in Zeitwerten angeben, mit Hilfe der Zeit nämlich, die das Licht – oder jede andere ähnliche Strahlung, wie etwa die von Mikrowellen – benötigt, um diese Entfernung zurückzulegen. Im Vakuum bewegt sich Licht mit einer Geschwindigkeit von 299 792,5 Kilometern in der Sekunde fort;

Aber es gibt mehr als 6000 Sterne. Als Galilei 1609 sein erstes Fernrohr gegen den Himmel richtete, entdeckte er eine große Anzahl schwächerer Sterne, die man mit unbewaffnetem Auge nicht sieht. Jedesmal, wenn das Fernrohr technisch verbessert wurde, bedeutete das eine reichliche Ausbeute neuer, bisher unbekannter, noch schwächerer Sterne.

So schien es immer weiterzugehen, und um 1800 konnte man endgültig von der Vorstellung der 6000 Sterne im Universum abgehen und auf die von einer unendlichen Anzahl Sterne und einem unbegrenzten Universum umschwenken. Im zweiten Fall gäbe es keine Antwort auf die Frage: »Wie weit entfernt ist der fernste Stern?«, denn dann gälte der Satz: »Es gibt keinen fernsten Stern!«

Wie gewöhnlich war der Menschheit aber der Gedanke an das Unendliche unangenehm. Der Angriff auf ein möglicherweise unendliches Universum wurde von zwei Seiten aus unternommen, von der Theorie und der Beobachtung.

Der deutsche Astronom Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (1758 bis 1840) lieferte theoretische Überlegungen, die die Existenz eines unendlichen Universums der Sterne in Frage stellten. 1826 trat er mit dem hervor, was später unter dem Namen »Olberssches Paradoxon« bekannt wurde. Zum besseren Verständnis wollen wir vorher folgende Voraussetzungen annehmen:

1. Das Universum ist unendlich; sie sind gleichmäßig im Universum verteilt.
2. Die Zahl der Sterne ist unendlich; sie sind gleichmäßig im Universum verteilt.
3. Die Sterne besitzen im ganzen Universum die gleiche mittlere Helligkeit.

Man stelle sich das Sonnensystem im Mittelpunkt eines solchen Universums vor und denke sich dieses Universum in dünne, konzentrische Schalen eingeteilt – so wie das etwa bei einer Zwiebel der Fall ist.

Der Flächeninhalt dieser dünnen Schalen vergrößert sich mit dem Quadrat der Entfernung. Wenn Schale A dreimal so weit von uns entfernt ist wie Schale B, dann ist die Fläche von Schale A 3^2 oder neunmal so groß wie die von Schale B. Wenn die Sterne über alle Schalen hinweg gleichmäßig verteilt sind (siehe Punkt 2 unserer Voraussetzungen), dann hat Schale A, die eine neunmal größere Oberfläche besitzt, auch neunmal so viele Sterne wie Schale B.

Das Olberssche Paradoxon

Gegen 1840 hatten die Astronomen endlich die Entfernung der Sterne ausgelotet, zumindest die der näher gelegenen; sie sind alle etwas mehr als 1 Parsec (= 3,26 Lichtjahre) entfernt.

Die nächste, fast unvermeidliche Frage lautet nun: In welcher Entfernung gibt es keine Sterne mehr? Wie weit von uns liegt der fernste Stern? Schließlich ist die Erde begrenzt, und auch das Sonnensystem nimmt einen begrenzten Raum ein. Wenn wir uns noch weiter in die Dinge vertiefen – bleiben wir dann im Reich des Endlichen? Oder sehen wir uns schließlich doch dem Unendlichen gegenüber? Eine Frage, die die Gelehrten von Anfang an beschäftigte.

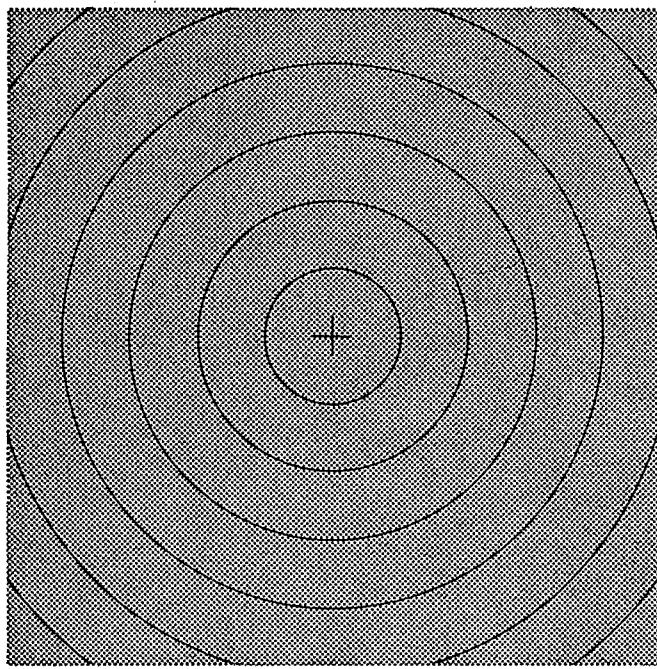
Wenn wir uns auf den Teil des Universums beschränken, den wir mit unbewaffnetem Auge sehen können, dann ist das Weltall endlich. Wir wissen, daß die mittlere Entfernung zwischen Sternen, jedenfalls in den uns nahe gelegenen Zonen, etwa 3 Parsecs (oder 10 Lichtjahre) beträgt. Wir wissen auch, daß es ungefähr 6000 mit dem bloßen Auge erfassbare Sterne gibt. Angenommen, dies wären alle vorhandenen Sterne, und sie wären alle durch diese mittlere Entfernung voneinander getrennt, dann würde eine Kugel mit einem Durchmesser von etwa 100 Parsecs oder 330 Lichtjahren alle 6000 Sterne umschließen.

Für menschliche Begriffe ist das eine ganz erstaunliche Größe. Eine Kugel mit einem Durchmesser von 100 Parsecs, also fast dreitausend Billionen (3000 000 000 000) Kilometer; ihre Größe würde vor dem 17. Jahrhundert jeden Astronomen erstaunt haben – und verblüffte noch viele, die später lebten.

Andererseits sinkt die Lichtintensität eines jeden Sterns mit dem Quadrat der Entfernung. Wenn Schale A dreimal so weit entfernt ist wie Schale B und neunmal so viele Sterne wie B enthält, dann ist jeder einzelne Stern in Schale A (bei überall einheitlicher mittlerer Helligkeit — Punkt 3) nur $(\frac{1}{3})^2$ oder $\frac{1}{9}$ so hell wie die Sterne in Schale B.

Wir folgern also, daß Schale A neunmal so viel Sterne wie Schale B besitzt und daß jeder Stern in Schale A $\frac{1}{9}$ mal so hell ist wie jeder Stern in Schale B, so daß das gesamte Licht, das von Schale A an das Sonnensystem abgegeben wird, $9 \times \frac{1}{9}$ des von Schale B abgegebenen ist. Mit anderen Worten: Schale A und Schale B liefern die gleiche Menge Licht an das Sonnensystem.

Dieses Rechenexempel können wir für alle anderen Schalen wiederholen. Daraus folgt, daß bei einer unendlichen Zahl Schalen (Punkt 1) die gesamte Lichtmenge, die uns erreicht, unendlich wäre,



(gleichmäßige Verteilung der Sterne an einer unendlichen Zahl von Schalen)

Das Olberssche Paradoxon

bloß daß die nahen Sterne das Licht der ferneren zum Teil überstrahlen würden. Aber selbst diese Abschirmung änderte nichts daran, daß der ganze Himmel wie die Oberfläche einer riesigen, hellen Sonne leuchten müßte. Das ist nun aber einmal nicht so. Olbers glaubte nun, eine Erklärung für dieses Paradoxon in der Existenz von Staubwolken im Raum finden zu können, Wölken, die das Licht von weiter entfernten Sternen absorbieren, so daß uns nur das Licht von relativ nahen Sternen erreichte. Aber diese Erklärung reicht nicht aus. Würden die Staubwolken das Licht absorbieren, müßten sie sich nach und nach erhöhen, bis sie genau so viel Licht abgäben, wie sie aufgenommen hätten. Die uns erreichende Lichtmenge wäre noch immer unendlich.

Irgend etwas kann mit Olbers' Voraussetzungen nicht stimmen. Entweder ist das Universum nicht unendlich groß oder, falls doch, dann ist die Anzahl der Sterne nicht unendlich. Glaubhafter scheint es indessen, daß es eine endliche — wenn auch sehr große — Anzahl Sterne gibt, die über einen endlichen — sehr großen — Raum verteilt sind.

Diese Schlußfolgerung, die sich aus Olbers' Überlegungen ergab, stimmte mit den sorgfältigen astronomischen Beobachtungen überein, die Wilhelm Herschel zu dieser Zeit anstellte.

Herschels Linse

Wenigstens eine der Voraussetzungen für das Olberssche Paradoxon scheint nicht hieb- und stichfest.

Natürlich können wir von der Annahme ausgehen, daß die Sterne im ganzen Raum gleichmäßig verteilt sind, die Beobachtungen aber, die wir von der Erde aus von einem Teil des Universums anstellen können, scheinen diese Ansicht nicht zu bestärken.

Rings um den Himmel zieht sich durch die Sternbilder Orion, Perseus, Kassiopeia, Cygnus (Schwan), Aquila (Adler), Sagittarius (Schütze), Centaurus (Zentaur) und Carina (Kiel des Schiffes) ein schwach leuchtendes Band. Im hellen Widerschein der Großstadtbeleuchtung verblaßt es, aber in einer mondlosen Nacht auf dem Land bietet es einen herrlichen Anblick.