universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Newcomb-Engelmanns populäre Astronomie

Newcomb, Simon
Engelmann, Rudolf

Leipzig [u.a.], 1914

Erster Teil. Geschichtliche Entwicklung des Weltsystems

urn:nbn:at:at-ubi:2-6606

Erster Teil.
Geschichtliche Entwicklung des Weltsystems.

EINLEITUNG.

Die Sternkunde ist die älteste der exakten Wissenschaften; sie zeichnet sich vor den anderen durch eine langsame, stufenweise Entwicklung von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart aus. In keiner anderen Wissenschaft verdankt jede einzelne Generation ihren Vorgängern so viel, in Tatsachen sowohl als in den grundlegenden Ideen, die den Fortschritt ermöglichten. Die vollständige Entwicklung der Vorstellung von einer runden und bewegten Erde, die ihren Lauf durch die Himmelsräume mit ihren Schwesterplaneten verfolgt, ist weder einem einzelnen Denker noch einem einzelnen Zeitalter zuzuschreiben. Sie ist vielmehr das Ergebnis eines allmählichen Erziehungsprozesses, dessen Gegenstand nicht ein Individuum, sondern das Menschengeschlecht war. Die großen Astronomen aller Zeiten haben auf Fundamenten gebaut, die von ihren Vorgängern gelegt waren. Die Theorie der allgemeinen Anziehung wurde von Newton auf die Gesetze Keplers, auf die Beobachtungen und Messungen seiner französischen Zeitgenossen und auf die Geometrie des Apollonius gegründet. Kepler benutzte als Material die Beobachtungen von Tycho Brahe und baute auf der Theorie des Kopernikus fort. Die Idee der Tychonischen Instrumente läßt sich zurückverfolgen bis zu den Arabern des Mittelalters. Andererseits war die Entdeckung des wahren Weltsystems durch Kopernikus nur möglich durch ein sorgfältiges Studium der scheinbaren Planetenbewegungen, wie sie sich in den Epizykeln des Ptolemäus aussprechen. In der Tat, je genauer man das große Werk des Kopernikus betrachtet, desto mehr ist man überrascht, zu sehen, wie vollständig ihm Ptolemäus und Hipparch Ideen und Tatsachen lieferten. Hipparch endlich fußte auf den sich über viele Jahrhunderte erstreckenden Beobachtungen und Aufzeichnungen der babylonischen und ägyptischen Priesterschaft.

Jede der großen Kulturperioden der alten Welt scheint ihr eigenes System der Astronomie gehabt zu haben, welches durch den besonderen Charakter der einzelnen Völker genau bezeichnet wird. Verschiedene in den Annalen der Chinesen enthaltene Begebenheiten zeigen, daß die Bewegung der Sonne und die Gesetze der Finsternisse in diesem Lande zu einer sehr frühen Zeit erforscht waren. Manche dieser Ereignisse dürften zwar durchaus mythisch sein, wie z. B. die Entsendung von Astronomen nach den vier Kardinalpunkten des Kompasses, um die Äquinoktien und Solstitien zu bestimmen. Auf etwas festerer Grundlage aber beruht ein Vorkommnis, welches schon sehr erhebliche astronomische Kenntnisse unter den alten Chinesen anzuzeigen scheint. Wir meinen das tragische Geschick von Hi und Ho, den Hofastronomen eines der alten Herrscher jenes Volkes. Es gehörte zu ihren Pflichten, sorgfältig die himmlischen Bewegungen zu erforschen und zu rechter Zeit das Eintreten einer Finsternis oder eines anderen merkwürdigen Phänomens zu verkünden. Doch diese beiden vergaßen ihre Pflicht, und eine Sonnenfinsternis trat ein, ohne daß sie davon Mitteilung gemacht hatten; die in solchem Falle üblichen religiösen Gebräuche wurden verabsäumt, und China schien darum dem Zorne der Götter ausgesetzt. Ihr Verbrechen zu sühnen, wurden die unwürdigen Astronomen auf kaiserlichen Befehl hingerichtet. Einige Geschichtsschreiber haben das Datum dieser Begebenheit festzusetzen versucht; ihre Angaben schwanken zwischen 2159 und 2128 v. Chr.

In der Astronomie der Inder sehen wir die Eigentümlichkeiten des kontemplativen Geistes dieses Volkes deutlich ausgeprägt. Ihre Einbildungskraft ergeht sich in Zeiträumen, die selbst die der modernen Astronomie geläufigen großen Zahlen in den Schatten stellen. In diesem, wie vielleicht noch in anderen alten Systemen finden wir Hindeutungen auf eine Konjunktion aller Planeten im Jahre 3102 v. Chr. Obschon wir nun allen Grund zu der Annahme haben, daß diese Konjunktion nicht durch wirkliche Aufzeichnung, sondern durch Rückwärtsrechnung der Planetenstellungen ermittelt worden ist, so zeigt doch schon die Tatsache, daß diese Völker imstande waren, eine derartige Rechnung auszuführen, daß die Bewegungen der Planeten durch viele Generationen beobachtet und registriert worden sein müssen, sei es durch die Inder selbst oder durch irgendein anderes Volk, von dem sie ihr Wissen hatten. Aus unseren heutigen Tafeln wissen wir sicher, daß jene Konjunktion durchaus keine genaue war; aber richtigere Bestimmungen ließen die rohen Beobachtungen jener Zeit nicht zu.

Von den Babyloniern ist den astronomischen Beobachtungen bereits in der allerfrühesten Zeit große Aufmerksamkeit gewidmet worden, anfangs

freilich ausschließlich zu astrologischen Zwecken. Aus der bemerkenswerten Genauigkeit, die ihre uns noch erhaltenen Angaben über die Periodizität der Finsternisse und der scheinbaren Stellung der Planeten, über die Wiederkehr der Konstellationen im Mondlaufe u. a. m. besitzen, dürfen wir auf vielhundertjährige, regelmäßig fortgesetzte Beobachtungen aller himmlischen Erscheinungen schließen. Astronomische Theorien jedoch sowie Versuche einer Erklärung des Weltsystems und der himmlischen Erscheinungen haben sich bisher bei den Babyloniern nicht nachweisen lassen.

Bei einem Volke, das, wie die alten Griechen, geneigt war, über Ursprung und Natur der Dinge zu spekulieren, während es die Beobachtung der Naturerscheinungen vernachlässigte, können wir nicht erwarten, ein System der Astronomie zu finden. Aber es gibt hier einige dem Pythagoras zugeschriebene Vorstellungen, die so häufig erwähnt und so eng mit der Astronomie des folgenden Zeitalters verbunden sind, daß wir vorübergehend ihrer gedenken müssen. Pythagoras soll gelehrt haben, daß die Himmelskörper auf einer Reihe von Kristallsphären angebracht seien, in deren gemeinschaftlichem Mittelpunkte die Erde sich befinde. An der äußersten dieser Sphären seien die Tausende von Fixsternen befestigt, die das Firmament erfüllen, während Sonne, Mond und Planeten ihre eigenen Sphären besitzen. Die Durchsichtigkeit aller sei vollkommen, so daß die Körper der äußeren Sphären durch sämtliche inneren hindurch sichtbar seien. Alle diese Sphären bewegen sich umeinander in eintägiger Umdrehung, auf diese Weise Aufgang und Untergang der Gestirne bedingend. Das Gleiten der Sphären aneinander verursache eine Art himmlischer Musik, eine »Musik der Sphären«, die den Himmelsraum belebe, aber zu fein und erhaben für sterbliche Ohren sei.

Es muß zugegeben werden, daß die Idee, die Fixsterne als an einer hohlen Kristallsphäre befestigt zu betrachten, sehr natürlich war. Sie schienen die Erde zu umkreisen, Tag für Tag, Generation nach Generation, ohne die geringste Änderung in ihren gegenseitigen Stellungen. Wenn zwischen ihnen keine feste Verbindung bestand, so schien es unmöglich, daß Tausende solcher Körper ihre weiten Bahnen so lange Zeit hindurch zurücklegen konnten, ohne daß auch nur einer unter ihnen seinen Abstand vom anderen änderte. Besonders schwer zu begreifen mußte es sein, wie sich alle um dieselbe Achse bewegen konnten. Befanden sie sich aber sämtlich an einer festen Sphäre und jeder an seinem festen Platze, so verschwand die Schwierigkeit. Nur die Planeten konnten, da sie ihren Ort unter den Sternen wechseln, nicht an dieselbe Sphäre versetzt werden.

Diese kugelförmige Gestaltung des Himmels verblieb in der Vor-

stellung der Menschen mit merkwürdiger Zähigkeit. Sowohl dem System von Ptolemäus wie dem von Kopernikus lag die Anschauung zugrunde, daß das Universum sphärisch gebildet sei, und der letztere suchte das Naturgemäße der sphärischen Form sogar durch die Analogie des Wassertropfens zu erweisen. Schwache Spuren derselben Vorstellung erscheinen sogar gelegentlich noch bei Kepler.

Die Schüler des Pythagoras bildeten sein phantastisches System weiter aus, und namentlich war es Philolaus (um 450 v. Chr.), der in einem sinnreich erdachten Weltsystem über den Meister hinausging und die Lehre von der täglichen Bewegung der Erde um ein »Zentralfeuer« aufstellte.

Der erste, der die trügerische Bahn der Spekulation verließ und auf dem Fundament der Anschauung und Erfahrung zu bauen suchte, war der Mathematiker Eudoxus; aber auch er konnte sich von dem oberflächlichen Eindrucke sinnlicher Wahrnehmung nicht frei machen und geriet so auf ein verwickeltes System rotierender Sphären, mit welchem er die auffallendsten Bewegungsvorgänge befriedigend darzustellen vermochte. Auch des größten Schülers von Plato, des Aristoteles, müssen wir hier gedenken, weil die Gewalt seines universellen Geistes alle Anschauungen über die organische wie unorganische Welt durch Jahrhunderte hindurch wesentlich beeinflußt und bestimmt hat. Mehr noch als Eudoxus, dessen Hypothesen er übrigens begeistert vertrat, betonte Aristoteles den Wert der Beobachtung und Erfahrung gegenüber der Spekulation. Aber, so viel er im einzelnen getan und erkannt hat, eine Erklärung der Naturerscheinungen gelang seiner Philosophie doch nicht, und speziell in der Astronomie kam er mit Eudoxus nicht über das alte System der Himmelssphären hinaus; die — allerdings kugelförmig gedachte — Erde ruhte auch nach ihm im Mittelpunkte der Welt, und die wenigen von ihm angestellten Beobachtungen reichten nicht hin, genauere Vorstellungen über die Bewegungen der Himmelskörper zu gewinnen.

Die Ehre, der Vater der wissenschaftlichen Astronomie zu sein, können wir erst dem Hipparch zuerkennen. Nicht allein scheinen seine Beobachtungen weit genauer gewesen zu sein, als die von irgendeinem seiner Vorgänger, sondern er bestimmte auch zuerst die Gesetze der scheinbaren Planetenbewegung und legte Tafeln an, aus denen die Bewegungen berechnet werden konnten. Wahrscheinlich war er auch der erste, der die Theorie der epizyklischen Bewegungen der Planeten aufstellte, die gewöhnlich nach seinem 300 Jahre jüngeren Nachfolger Ptolemäus benannt wird. Den Versuch einer geometrischen Erklärung dieser Erscheinungen hat aber, wie bemerkt, schon Eudoxus gemacht.

Beginnen wir demnach mit der Zeit des Hipparch, so bietet die all-

gemeine Ansicht von der Struktur des Universums oder vom »Weltsystem«, wie es gewöhnlich heißt, drei große Entwicklungsepochen dar, deren jede durch ein in seinen fundamentalen Prinzipien von den beiden anderen vollständig verschiedenes System gekennzeichnet wird. Diese sind:

1. Das sogenannte Ptolemäische System, welches in Wirklichkeit dem Hipparch oder einem noch älteren Astronomen zugehört. In diesem System hat die Erde keine Bewegung, und die scheinbaren Bewegungen der Sterne und Planeten um sie werden alle als reell betrachtet.

2. Das Kopernikanische System, in welchem gezeigt wird, daß die Sonne der wirkliche Mittelpunkt der planetarischen Bewegungen ist und die Erde ein um seine Achse rotierender und um die Sonne kreisender Planet.

3. Das Newtonsche System, in welchem alle Bewegungen der Himmelskörper durch das eine Gesetz der allgemeinen Anziehung erklärt werden.

Dieser natürliche Entwicklungsgang zeigt, in welcher Reihenfolge die Erkenntnis des Baues und der Gesetze des Universums am besten und klarsten dem Verständnis dargeboten werden kann. Wir wollen daher die gleiche Reihenfolge innehalten und einer jeden der drei genannten Entwicklungsstufen ein besonderes Kapitel widmen. Wir beginnen mit dem, was allgemein bekannt ist oder wenigstens von jedem leicht erkannt wird, der den Himmel mit hinreichender Sorgfalt betrachtet. Der Beobachter werde in sternheller Nacht im Freien gedacht, und es möge ihm gezeigt werden, wie die Himmelskörper von Stunde zu Stunde sich zu bewegen scheinen. Dann wollen wir ihn lehren, welche Veränderungen er in ihrer Stellung wahrnehmen wird, wenn er seine Beobachtung durch Monate und Jahre fortsetzt. Durch Verbindung der so erkannten scheinbaren Bewegungen wird sich der Beobachter allmählich das alte oder Ptolemäische Weltsystem bilden. Hat er dieses System klar vor Augen, so ist zu dem des Kopernikus nur ein Schritt, der allein in dem Nachweise besteht, daß gewisse eigentümliche Bewegungen, welche Sonne und Planeten gemeinschaftlich zu besitzen scheinen, in Wirklichkeit von der Umdrehung der Erde um die Sonne herrühren, und daß die scheinbare tägliche Umdrehung der Himmelskugel eine Folge der Rotation der Erde um ihre eigene Achse ist. Die Gesetze der wahren Bewegungen der Planeten, durch Kepler vollständig klargelegt, werden endlich von Newton zusammengefaßt und begründet in dem einen Gesetze der Gravitation gegen die Sonne. Dies ist der Gang der Vorstellungen und des Denkens, zu welchem wir zunächst den Leser einladen.

KAPITEL I.

Die alte Astronomie oder die scheinbaren Bewegungen der Himmelskörper.

1. Die Himmelskugel.

Es ist eine uns von Jugend auf vertraute Tatsache, daß alle Himmelskörper — Sonne, Mond und Sterne — sich an einem Gewölbe zu befinden scheinen, welches, hoch über unser Haupt sich erhebend, nach allen Seiten zum Horizont hinabsteigt. Hier verhindert die Erde, auf der es zu ruhen scheint, es weiter zu überblicken. Aber wir könnten, wenn die Erde nicht vorhanden oder vollkommen durchsichtig wäre, das Gewölbe abwärts nach jeder Richtung bis zu unserem Fußpunkte verfolgen und Sonne, Mond und Sterne in jeder Richtung sehen. Das Himmelsgewölbe über uns würde dann also mit dem entsprechenden unter uns eine vollständige Kugel bilden, in deren Zentrum der Beobachter gestellt zu sein schiene. Dies ist seit alter Zeit bekannt gewesen. Die scheinbaren Örter der Himmelskörper, sowie ihre scheinbaren Bewegungen, sind stets durch ihre Lage und Bewegungen an der Sphäre bestimmt worden. Die Tatsache, daß letztere nur in der Vorstellung existiert, verringert ihren Wert nicht, da sie uns bestimmte Begriffe von den Richtungen nach den Himmelskörpern zu bilden ermöglicht.

Es kommt nicht darauf an, wie groß wir diese Sphäre annehmen, solange wir nur voraussetzen, der Beobachter sei in ihrem Mittelpunkte, so daß sie von ihm nach allen Seiten gleichweit entfernt ist. In der Sprache und im Sinne exakter Astronomie wird sie indessen immer als unendlich angenommen, da dann der Beobachter, wenn er nach einem anderen Punkte, und sei es selbst nach einem der Himmelskörper, sich versetzt denkt, für alle praktischen Zwecke doch immer noch so gut wie im Mittelpunkte sein wird. In diesem Falle werden die Himmelskörper aber nicht auf der unendlichen Sphäre selbst, sondern nur auf der Gesichtslinie vom Beobachter nach einem Punkte der Sphäre angenommen. Diese Beziehungen werden leicht verstanden, wenn der Beobachter sich selbst als leuchtend und Strahlen nach jeder Richtung auf die unendlich entfernte Himmelskugel werfend denkt. Dann werden die scheinbaren Positionen der verschiedenen Himmelskörper an der Sphäre die sein, wo ihre Schatten dieselbe treffen (Fig. 1). Zugleich ist klar, daß alle Körper, die, vom Beobachter O aus gesehen, auf derselben geraden Linie liegen, an demselben Punkte der Sphäre erscheinen werden, z. B. die drei Punkte t so, als wenn sie in T wären. Blickt der Beobachter z. B. nach dem Monde, so wird dessen Schatten die Sphäre an einem Punkte treffen, der auf einer geraden Linie liegt,

die vom Auge des Beobachters durch das Mondzentrum bis zur Himmelskugel gezogen ist. Versetzt er sich nun in Gedanken nach dem Monde und blickt zurück nach der Erde, so wird er diese auf einen Punkt der Sphäre projiziert sehen, der dem direkt entgegengesetzt ist, in welchem er vorher den Mond sah. Auf welchen Planeten auch immer er sich versetzt denkt, er würde stets die Erde und die anderen Planeten auf diese imaginäre Kugel ebenso projiziert sehen, wie wir die Himmelskörper auf sie projiziert wahrnehmen.

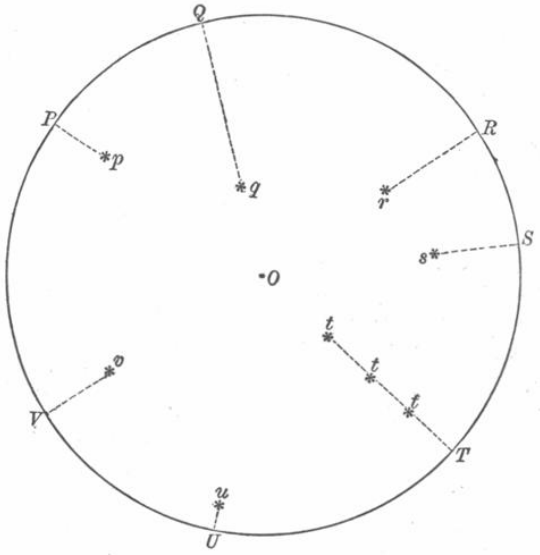


Fig. 1.

Dies ist alles, was die moderne Astronomie von den Kristallsphären des Pythagoras und seiner Nachfolger übrig gelassen hat. Aus einem festen, alle Sterne haltenden Körper ist die Sphäre zu einem durchaus immateriellen Begriff, einer bloßen Vorstellung des Verstandes geworden, welche nur die Richtungen, in denen die Gestirne gesehen werden, zu definieren hat.

2. Die tägliche Bewegung der Gestirne.

Wenn wir die Gestirne einige Stunden betrachten, so finden wir sie in fortdauernder Bewegung: die im Osten steigen auf, die im Süden bewegen sich nach Westen, und die im Westen sinken hinab zum Horizont. Wir wissen, daß diese Bewegung nur eine scheinbare ist und von der Rotation der Erde um ihre Achse herrührt; aber da wir vorläufig nur die

Dinge, wie sie erscheinen, beschreiben wollen, so können wir von der Bewegung als einer reellen reden. Die Beobachtung weniger Tage zeigt ferner, daß die ganze Himmelskugel sich jeden Tag um eine Achse zu drehen scheint. Dieser Umdrehung, welche die Sonne in ewigem Wechsel über und unter den Horizont führt, verdanken wir den Wechsel von Tag und Nacht. Natur und Wirkung dieser Bewegung kann am besten aus der Verfolgung der scheinbaren nächtlichen Bewegung der Sterne erkannt werden. Wir lernen aus solcher Beobachtung bald, daß es einen Punkt

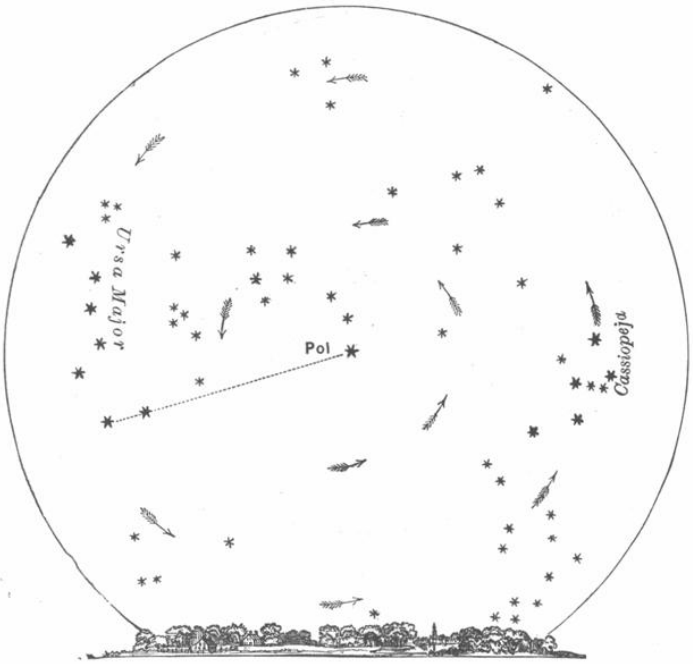


Fig. 2. Zirkumpolarsterne in der Breite von 40°.

am Himmel gibt, der in beständiger Ruhe ist. Auf der nördlichen Halbkugel liegt dieser Punkt im Norden, zwischen Scheitelpunkt (*Zenit*) und Horizont, und heißt der *Nordpol*. Rund um diesen Pol scheinen alle Gestirne sich wie um ein festes Zentrum zu drehen, jedes in einem Kreise, dessen Größe von der Entfernung des Himmelskörpers vom Pol abhängt. Es gibt zwar keinen genau am Pole gelegenen Stern, aber einen, der nur wenig mehr als einen Grad oder zwei Monddurchmesser von ihm absteht und einen so kleinen Kreis beschreibt, daß das unbewaffnete Auge, ohne genau zu beobachten, eine Stellungsänderung an ihm nicht wahrnehmen

kann. Dieser Stern heißt daher der *Polarstern*. Derselbe kann leicht gefunden werden, wenn man sich die beiden hinteren Sterne des allbekannten grossen Himmelswagens durch eine Linie verbunden denkt und diese etwa um das Fünffache nach Norden verlängert (s. Fig. 2).

Wir wollen nun, um die Wirkung der täglichen Bewegung nahe dem Pole kennen zu lernen, einen Stern im Norden zwischen Pol und Horizont verfolgen. Wir sehen bald, daß ein solcher, statt wie gewöhnlich sich von Osten nach Westen zu bewegen, in der Tat gegen Osten fortrückt. Nachdem er die Nord-Südlinie (den *Meridian*) passiert hat, beginnt er in gekrümmter Bahn aufwärts zu steigen, bis im Nordosten seine Bewegung vertikal ist. Darauf wendet er sich allmählich gegen Westen, passiert die Nord-Südlinie jetzt ebenso weit über, wie vorher unter dem Pol, und auf der Westseite in stetiger Krümmung hinabsinkend, befindet er sich nach 24 Stunden wieder unter dem Pole. Der Durchgang durch den Meridian über dem Pole heißt die obere, der unter dem Pole die untere *Kulmination*. In Fig. 2 ist der Lauf rund um den Pol durch die Pfeile angedeutet. Mit bloßem Auge können wir nicht den ganzen Weg eines einzelnen Sternes verfolgen, weil der Tag dazwischen tritt; setzten wir indessen die Beobachtung jede klare Nacht während eines Jahres fort, so würden wir ihn in jedem Punkte seiner Bahn wahrnehmen. Ein Stern, der den soeben beschriebenen Weg verfolgt, geht nie unter und kann in jeder klaren Nacht gesehen werden. Denken wir uns einen Kreis rings um den Pol gezogen, der gerade den Horizont berührt (Fig. 2), so werden sich alle Sterne innerhalb dieses Kreises in dieser Weise bewegen; er heißt deshalb der Kreis der beständigen Sichtbarkeit, und die von ihm umschlossenen, niemals untergehenden Sterne werden *Zirkumpolarsterne* genannt.

Je weiter wir uns vom Pol entfernen, in desto größeren Kreisen bewegen sich die Gestirne, bis wir, wenn sie gerade den Horizont streifen, den Kreis der beständigen Sichtbarkeit erreichen. Außerhalb dieses Kreises muß jeder Stern, je nach seiner Entfernung vom Pole, für eine längere oder kürzere Zeit unter den Horizont sinken. Steht er nur wenige Grade außerhalb, so wird er zwischen Norden und Westen untergehen und nach einigen Stunden zwischen Norden und Osten wieder emporsteigen.

Überschreiten wir den Kreis beständiger Sichtbarkeit noch mehr, so finden wir, daß die Sterne in ihrer oberen Kulmination nicht unerheblich südlich vom Zenit den Meridian passieren oder kulminieren, daß sie rascher untergehen und länger unter dem Horizont bleiben. In Fig. 3 gilt dies für die Sterne, die wie s' zwischen dem Himmelsäquator AQ und dem kleineren Kreise MN (der dem Kreise der Fig. 2 entspricht) liegen. Kommen wir an den *Äquator* selbst, der vom Pole P ein Viertel des Kreis-

umfanges oder 90° absteht*), und der die Projektion des Erdäquators an den Himmel ist, so wird die Hälfte des Weges über, die Hälfte unter dem Horizont SN liegen. Südlich vom Äquator werden die von den Sternen beschriebenen Kreise wieder kleiner, und jetzt liegt mehr als die Hälfte ihres scheinbaren täglichen Weges unter dem Horizont. Nahe dem Südpunkte S zeigen sie sich nur kurze Zeit über dem Horizont, und unterhalb desselben ist endlich ein Raum ($SP'R$), in welchem sie für uns niemals aufgehen. Der unterhalb des Horizonts gelegene und ihn im Südpunkte berührende Kreis SR heißt entsprechend dem früheren der Kreis beständiger Unsichtbarkeit; er ist von gleicher Größe wie der andere, und

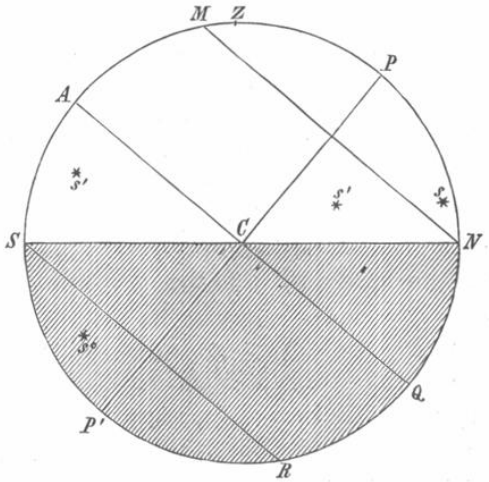


Fig. 3.

der Südpol (P') liegt in seinem Zentrum, ebenso wie der Nordpol (P) im Zentrum des Kreises beständiger Sichtbarkeit. Im Raume MPN liegen also die Zirkumpolarsterne, wie s (s. Fig. 3), in $SAMNQR$ die auf- und untergehenden, wie s', in $SP'R$ die nicht aufgehenden, also stets unsichtbaren Gestirne ($s°$). Die unter dem Horizont liegende Halbkugel ist schattiert. Die Kreise, mit Ausnahme des durch Nord- und Südpunkt, Pol und Zenit gehenden Meridians, erscheinen in der Figur als gerade Linien.

Reisen wir auf der Erde nach Süden, so finden wir, daß der Nordpol allmählich zum Horizont hinabsinkt, während neue Gestirne über den südlichen Horizont emporsteigen; infolgedessen werden die Kreise be-

*) Der Kreisumfang wird bekanntlich in 360 Grade (°) geteilt, jeder Grad in 60 (Bogen-) Minuten (′), jede Minute in 60 (Bogen-) Sekunden (″).

ständiger Sichtbarkeit und Unsichtbarkeit immer kleiner. Am Äquator hat sich der Südpol bis zum südlichen Horizont erhoben, der Nordpol ist bis zum nördlichen hinabgesunken; der Himmelsäquator geht von Osten nach Westen durch das Zenit, und alle Gestirne beschreiben während ihrer täglichen Umdrehung Kreise, deren eine Hälfte über, deren andere unter dem Horizont liegt. Diese Kreise stehen alle senkrecht zum Horizont. Südlich vom Erdäquator ist nur der Südpol sichtbar, und der Nordpol, den wir in nördlichen Breiten sehen, bleibt unter dem Horizont. Südlich vom südlichen Wendekreise steht die Sonne mittags im Norden und bewegt sich für den Beschauer, statt von links nach rechts, vielmehr von rechts nach links.

Könnten wir nach Norden bis an den Pol gelangen, so stiege der Nordpol immer höher, der Kreis der beständigen Sichtbarkeit würde immer größer werden, und endlich am Pole selbst wäre der Pol in unserem Zenit, der Äquator im Horizont, und alle sichtbaren Gestirne würden dem Horizont parallele Kreise beschreiben.

Aus diesen Tatsachen geht hervor, daß die geographische Breite eines Ortes gleich der Höhe des Pols über dem Horizont (oder, was dasselbe ist, gleich der Entfernung des Zenits vom Äquator) ist; ebenso zeigt die Betrachtung der Fig. 3, daß alle Sterne, deren Abstand vom Pole kleiner ist als die Polhöhe (PCN) oder die geographische Breite eines Ortes, Zirkumpolarsterne sind.

Nach dem vorangehenden können wir die Gesetze der täglichen Bewegung so zusammenfassen:

1. Die Himmelskugel, mit Sonne, Mond und Sternen, scheint sich im Laufe eines Tages um eine geneigte, durch den jedesmaligen Beobachtungsort gehende Achse zu drehen.

2. Das obere Ende dieser Achse weist in unserer Hemisphäre nach dem Nordpole; das andere geht durch die Erde auf den Südpol zu, der dem Nordpole diametral entgegengesetzt ist und daher unter dem Horizont liegt.

3. Alle Fixsterne bewegen sich während dieser Umdrehung zusammen und in gleichbleibender gegenseitiger Entfernung so, als ob sie sich auf einer festen Sphäre befänden.

4. Nördlich von dem Himmelsäquator, dem Kreise also, den man sich in gleichem Abstande von Nord- und Südpol rings um den Himmel gezogen denken kann, vollführen in unseren Gegenden alle Gestirne mehr als die Hälfte ihrer Umdrehung über dem Horizont; südlich von ihm dagegen weniger als die Hälfte.

3. Bewegung der Sonne unter den Sternen.

Die augenfälligste Klassifikation der mit bloßem Auge sichtbaren Himmelskörper ist die in Sonne, Mond und Sterne. Unter den letzteren gibt es fünf, die ihre gegenseitige Stellung beständig ändern, während die große Mehrzahl Jahr für Jahr und Jahrhundert für Jahrhundert dieselben relativen Stellungen an der Himmelskugel beizubehalten scheint. Diese fünf bilden die den Alten bekannten *Planeten* oder Wandelsterne, ihre Namen sind: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn; zu ihnen treten als bewegte Gestirne noch Sonne und Mond, sowie gelegentlich die hellen Kometen hinzu. Die übrigen dem bloßen Auge für gewöhnlich sichtbaren Gestirne heißen *Fixsterne,* weil sie, abgesehen von der oben beschriebenen gemeinschaftlichen täglichen, scheinbar keine Bewegung zeigen. Merken wir uns dagegen die Stellungen von Sonne, Mond und Planeten unter den Sternen für eine Reihe aufeinanderfolgender Tage, so werden wir gewisse langsame Veränderungen gewahr, die wir im folgenden, mit der Sonne beginnend, beschreiben wollen. Der Leser muß sich dabei erinnern, daß wir jetzt nicht mehr die scheinbare tägliche Bewegung, sondern gewisse, weit langsamere Bewegungen einiger Himmelskörper relativ zu den Fixsternen aufsuchen, wie sie wahrgenommen würden, auch wenn das Himmelsgewölbe nicht als Ganzes um eine Achse rotierte.

Beobachten wir, Nacht für Nacht, die genaue Stunde und Minute, zu welcher irgendein Fixstern infolge seiner täglichen Bewegung einen festen Punkt passiert, z. B. also an einem Turme oder Hause verschwindet oder erscheint, so finden wir bald, daß dies jeden Abend etwa 4 Minuten früher geschieht als den Abend zuvor. Die Fixsternsphäre macht eine Umdrehung also nicht in genau 24 Stunden, sondern in 23 Stunden 56 Minuten. Notieren wir demnach die Stellung des Sternes gegen die Nord-Südlinie oder den Meridian täglich genau zu derselben Zeit, so werden wir ihn immer weiter gegen Westen finden. Als Beispiel wollen wir den hellsten Stern im Sternbilde des Löwen, Regulus, nehmen. Beobachten wir diesen am 23. März, so passiert er den Meridian, er kulminiert, um 10 Uhr abends. Am 23. April dagegen ist er um 10 Uhr schon 2 Stunden westlich vom Meridian, er passiert ihn um 8 Uhr. Am 23. Mai kulminiert er um 6 Uhr, also vor Sonnenuntergang, und kann daher im Meridian überhaupt nicht mehr mit freiem Auge gesehen werden. Ende Juni geht er nachmittags bei hellem Sonnenschein durch den Meridian und wird erst in der Dämmerung sichtbar, wenn er schon weit aus dem Meridian nach Westen gerückt ist; Ende Juli geht er in der Dämmerung unter und verschwindet nun bald ganz in den Strahlen der Sonne. Dies zeigt uns, daß die Sonne sich

stetig dem Sterne von Westen genähert hat, bis sie im August ihm so nahe gekommen ist, daß er unsichtbar wird.

Führen wir unsere einfache Rechnung fort, so finden wir, daß Regulus am 23. August den Meridian um Mittag, also nahe zur selben Zeit wie die Sonne, passiert. Im September hat ihn die Sonne überholt, er kulminiert um 10 Uhr vormittags; man kann ihn also in der Morgendämmerung vor der Sonne aufgehen sehen. Die Sonne entfernt sich nun immer weiter nach Osten, der Stern geht immer früher auf, bis er im Februar bei Sonnenuntergang auf-, bei Sonnenaufgang untergeht. Im März endlich passiert er den Meridian abermals um 10 Uhr abends; nach einem Jahre haben also Sonne und Stern, in stetiger Veränderung, ihre anfängliche gegenseitige Stellung wieder erlangt. Aber der Stern ist 366 mal auf- und untergegangen, die Sonne dagegen nur 365 mal; letztere hat also durch die beschriebene langsame Bewegung nach Osten eine volle Umdrehung verloren.

Wären die Sterne am Tage sichtbar, so könnte die scheinbare Bewegung der Sonne unter ihnen im Laufe eines einzigen Tages wahrgenommen werden. Könnten wir z. B. den Aufgang des Regulus am Morgen des 22. August 1914 beobachten, so würden wir die Sonne etwas südlich und westlich von ihm (in Stellung 1 der Fig. 4) finden; bei Sonnenuntergang würde sie dagegen ungefähr südlich vom Sterne stehen (Stellung 2). Am nächsten Morgen würde die Stellung 3 stattfinden, der Stern stände jetzt schon etwas westlich, ginge also früher auf als die Sonne. Beim Sonnenuntergang dieses Tages würde die gegenseitige Stellung wie in 4 sein und so fort.

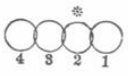


Fig. 4.

Die Bahn, welche die Sonne im Laufe eines Jahres unter den Sternen beschreibt, heißt die *Ekliptik*. Ebenso wie die Pole des Äquators sind auch die Pole der Ekliptik zwei am Himmel diametral gegenüberliegende Punkte, jeder in dem Mittelpunkt einer der zwei Hemisphären, in welche die Ekliptik die Himmelskugel teilt.

Die Bestimmung der Sonnenbewegung längs der Ekliptik darf als Anfang der wissenschaftlichen Astronomie betrachtet werden. Die vorgeschichtlichen Astronomen teilten die Ekliptik und den schmalen zu beiden Seiten sich hinziehenden Gürtel (den *Tierkreis* oder *Zodiakus*) in 12 Teile, letztere bekannt als die Zeichen des Tierkreises. Sehr oberflächliche Beobachtung schon mußte zeigen, daß der Wechsel der Jahreszeiten mit den Änderungen in der Mittagshöhe der Sonne und in der Länge des Tages zusammenhängt; aber erst durch genauere Erforschung der Lage der Ekliptik und der Bewegung der Sonne in ihr konnte erkannt werden, wodurch diese Änderungen im täglichen Laufe der Sonne

hervorgebracht werden. Sie erweisen sich als eine Folge der Tatsache, daß Ekliptik und Äquator nicht zusammenfallen, sondern gegeneinander unter einem Winkel von 23° bis 24° geneigt sind. Die Neigung dieser beiden größten Kreise*) heißt die *Schiefe der Ekliptik*. Wie alle größten Kreise, schneiden sich auch Ekliptik und Äquator in zwei diametral gegenüberstehenden Punkten. Steht die Sonne in einem derselben, so geht sie genau im Osten auf und im Westen unter; die eine Hälfte ihres täglichen Laufes liegt über, die andere unter dem Horizont. Tag und Nacht sind daher gleich, und aus diesem Grunde heißen die beiden genannten Punkte die Nachtgleichenpunkte oder *Äquinoktien*.

Etwa am 21. März ist die Sonne im Frühlingsnachtgleichenpunkte oder kurz Frühlingspunkte. Die nächsten 3 Monate steigt sie über den Äquator empor und steht am 22. Juni etwa $23^1/_2°$ nördlich von ihm. Dieser Punkt der Ekliptik heißt der Sommersonnenwendepunkt oder das *Sommersolstitium*, weil die Sonne hier, in bezug auf den Äquator, zum Stillstand zu kommen scheint und sich ihm wieder zuzuwenden beginnt. Nahe diesem Solstitium, also im Sommer, geht die Sonne nördlich vom Ostpunkt auf, kulminiert (in unseren Breiten) in beträchtlicher Höhe und geht nördlich vom Westpunkt unter. Zugleich liegt, da sie nördlich vom Himmelsäquator steht, mehr als die Hälfte ihres täglichen Laufes über dem Horizont, die Tage sind also länger als die Nächte, und lange Tagesdauer wie große Sonnenhöhe im Meridian bewirken die Hitze unseres Sommers.

Während der nächsten 3 Monate, von Ende Juni bis September, sinkt die Sonne allmählich zum Äquator hinab und erreicht ihn, etwa am 23. September, im Herbstnachtgleichenpunkt; hier sind abermals Tag und Nacht von gleicher Länge. Die nun folgenden 6 Monate steht die Sonne südlich vom Äquator; bis zum 22. Dezember entfernt sie sich immer weiter nach Süden von ihm und erreicht etwa an diesem Tage, im *Wintersolstitium*, ihre größte südliche Abweichung oder Deklination mit wiederum $23^1/_2°$**). In dieser Zeit liegt mehr als die Hälfte der Tagesbahn unter dem Horizont, die Nächte sind also länger als die Tage, und kurze Tage wie niedrige Sonnenhöhe, auch am Mittage, bedingen die Winterkälte. Für

*) Größte Kreise am Himmel sind diejenigen, in deren Mittelpunkt sich der Beobachter (die Erde) befindet.

**) Der Abstand der Sonne vom Frühlingsäquinoktium auf den Äquator bezogen heißt ihre Rektaszension; der Abstand vom Äquator selbst, senkrecht nach den Polen zu gezählt, die nördliche oder südliche Deklination; der Abstand vom Frühlingspunkte, in der Ekliptik gerechnet, ihre Länge. Der Abstand von der Ekliptik oder die Breite ist bei der Sonne stets sehr nahe Null (mehr s. II. Teil, Kap. II).

die südliche Hemisphäre kehren sich alle diese Verhältnisse um; sie hat bei niedrigem Sonnenstande Winter, während wir bei hohem Sonnenstande Sommer haben, und Sommer, während auf der nördlichen Hemisphäre Winter ist.

Über die Entstehung der ältesten Einteilung des Tierkreises oder Zodiakus in Bilder und Zeichen besitzen wir keine verbürgte geschichtliche Nachricht; doch darf als feststehend angesehen werden, daß sie babylonischen Ursprungs ist und zum Teil wahrscheinlich bis in das vierte Jahrtausend vor Christi Geburt zurückreicht. Einzelne Forscher haben versucht, die Namen zu Erscheinungen im Tierleben sowie zu den Jahreszeiten und den in ihnen vorgenommenen landwirtschaftlichen Beschäftigungen in Beziehung zu bringen, andere halten sie für eine Darstellung religiöser Symbole. Jedoch beruhen alle diese Deutungen nur auf Vermutungen, die um so unsicherer sind, als die Benennung der einzelnen Zeichen im Laufe der Jahrhunderte mancherlei Änderungen erfahren hat. Auch ist zu beachten, daß infolge der Präzession die Tierkreisbilder nicht immer denselben Jahreszeiten entsprochen haben, so daß zu einer sicheren Deutung der Namen eine viel genauere Kenntnis des Zeitpunktes ihrer Entstehung erforderlich wäre, als wir tatsächlich besitzen.

Die Sternbilder des Zodiakus nehmen, wie man auf den Sternkarten sieht, ganz ungleiche Räume am Himmel ein. Im Anfange waren sie einfach 12 »Häuser« für die Sonne, die sie im Laufe des Jahres durchlief. Hipparch fand zuerst dieses Einteilungssystem für genauere astronomische Zwecke gänzlich ungenügend und teilte daher Ekliptik und Zodiakus in 12 gleiche Teile, jeden zu 30°, die *Zodiakalzeichen* genannt wurden. Er gab ihnen die Namen der Konstellationen, die ihnen am nächsten entsprachen. Mit dem Frühlingsäquinoktium beginnend, wurde der erste Bogen von 30° das Zeichen des Widders (Aries) genannt, der zweite das des Stiers (Taurus) und so fort. Der Gebrauch, auf die Ekliptik bezogene Sternpositionen nach »Zeichen« zu rechnen, hat bis in das vorletzte Jahrhundert gedauert, ist aber nunmehr als unbequem ganz abgekommen. Die Ekliptik wird jetzt, wie jeder andere Kreis, in 360 Grade geteilt, die vom Frühlingspunkt aus in der Richtung der Sonnenbewegung fortlaufend von 0° bis 360° gezählt werden.

4. Präzession der Äquinoktien; das Sonnenjahr.

Durch Vergleichung seiner eigenen Beobachtungen mit denen seiner Vorgänger fand Hipparch, daß die Abstände der Sterne von dem Frühlingspunkt östlich von demselben stets größer, die der Sterne westlich

von ihm immer kleiner wurden, daß also der Frühlingspunkt und ebenso natürlich der Herbstnachtgleichenpunkt langsam und zwar mindestens 1° im Jahrhundert nach Westen fortrückte. Seine Nachfolger bestimmten diese *Präzession der Äquinoktien* genauer: sie beträgt 50″3 in einem Jahr oder nahe 1° in 70 Jahren. Sorgfältigere Beobachtung zeigte später, daß diese Veränderung hauptsächlich die Folge einer Bewegung des Äquators ist, die wiederum aus einer Änderung in der Richtung der Erdachse bzw. Himmelsachse entsteht. Die Ekliptik ändert ihre Lage unter den Sternen so wenig, daß diese Änderung erst aus den verfeinerten Beobachtungen der Neuzeit geschlossen werden konnte. In Wirklichkeit besteht also die Präzession in einer sehr langsamen kreisenden Bewegung des Pols des Äquators um den Pol der Ekliptik, und zwar beträgt die Zeit eines vollen Umlaufes etwa 26000 Jahre. Vollständig genau ist diese Zeit nie berechnet worden, und sie würde auch, wegen mancher kleiner Veränderungen, denen die Bewegung unterworfen ist, nicht immer dieselbe sein; doch weicht sie nicht bedeutend von der genannten Zahl ab. Die eben erwähnte, höchst langsame Bewegung der Ekliptik selbst und daher auch ihres Pols kompliziert die Bewegung des Pols des Äquators um den ersteren einigermaßen; im allgemeinen ist aber die von ihm beschriebene Kurve sehr nahe ein Kreis von 47° im Durchmesser. Zur Zeit des Hipparch stand unser jetziger Polarstern 12° vom Nordpol entfernt. Seitdem hat sich der Pol dem Sterne beständig genähert und wird den geringsten Abstand, von weniger als einem halben Grad, um das Jahr 2100 erreichen und sich von da an allmählich wieder entfernen. Nach 12000 Jahren wird er nahe der Leier stehen, und der hellste Stern dieses Sternbildes, die Wega, wird alsdann auf den Namen des Polarsterns Anspruch erheben dürfen. Der Äquator zeigt natürlich eine der Polbewegung entsprechende Bewegung, da er gegen die Polarachse eine konstante Neigung (90°) besitzt; ebenso werden sich auch seine Durchschnittspunkte mit der Ekliptik, die Nachtgleichenpunkte, stetig ändern.

Es muß natürlich immer festgehalten werden, daß die verschiedenen in diesem Kapitel besprochenen Bewegungen an der Himmelskugel nur scheinbare sind und aus der Bewegung der Erde selbst, wie wir in dem Kapitel über das Kopernikanische System sehen werden, entspringen. Die tägliche Umdrehung der Himmelskugel ist eine Folge der Umdrehung der Erde um ihre Achse und die Präzession eine Wirkung der Richtungsänderung dieser Achse. Die Ursache der Präzession werden wir später kennen lernen.

Eine wichtige Folge der Präzession ist ferner, daß ein Jahresumlauf der Sonne unter den Sternen nicht genau der Wiederkehr der Jahreszeiten

entspricht. Die letztere hängt von der Stellung der Sonne zum Frühlingspunkte ab, indem der Zeitpunkt, zu welchem dieselbe den Äquator nach Norden zu kreuzt, stets (in unserer Hemisphäre) den Frühlingsanfang bezeichnet, gleichgültig, wo die Sonne sich dabei unter den Sternen befindet. Wenn sie nun, vom Frühlingsäquinoktium aus, nach Umkreisung des Himmels zum Frühlingspunkte zurückkehrt, so erreicht sie ihn, infolge der Bewegung des Äquators oder des Fortrückens des Äquinoktiums gegen Westen, jetzt ungefähr 20 Minuten eher, als sie bei demselben Sterne wieder eintrifft. In einem Jahre ist der Unterschied klein; er häuft sich aber im Laufe der Jahrhunderte bedeutend an und beträgt z. B. in einem Jahrtausend schon beinahe 14 Tage. Wir müssen demnach zwischen dem *siderischen* und dem *tropischen Jahre* unterscheiden; ersteres ist die Zeit eines Umlaufes der Sonne unter den Sternen, letzteres die Zeit eines Umlaufes in Beziehung zum Äquinoktium, weshalb es auch das Äquinoktialjahr heißt. Die Länge dieser beiden Jahre ist:

$$\text{Siderisches Jahr} = 365^{d}.25636 = 365^{d}\ 6^{h}\ 9^{m}\ 9^{s}\text{*)}$$
$$\text{Tropisches Jahr} = 365.24220 = 365\ \ 5\ 48\ 46.$$

Da die Rückkehr der Jahreszeiten vom tropischen Jahre abhängt, so liegt dieses dem Kalender und den Einrichtungen des bürgerlichen Lebens überhaupt zugrunde. Seine wahre Länge ist $11^{m}\ 14^{s}$ geringer als $365^{1}/_{4}$ Tage. Einige Folgen dieses Unterschiedes werden bei der Erklärung des Kalenders besprochen werden.

5. Die Mondbewegung.

Jedermann weiß, daß der Mond in etwa einem Monate die Himmelskugel umläuft, und daß er während dieses Umlaufes eine Reihe verschiedener, von seiner Stellung zur Sonne abhängiger *Phasen* darbietet, deren vier hauptsächlichste als Neumond, erstes Viertel, Vollmond und letztes Viertel bekannt sind. Bei Neumond steht der Mond mit der Sonne in *Konjunktion*, d. h. beide Gestirne haben gleiche Länge, bei Vollmond sind sie um 180° in Länge verschieden, oder sie befinden sich in *Opposition*; beim ersten und letzten Viertel sind die Längen beider Gestirne um 90° verschieden. Eine genauere Betrachtung dieser Phasen während einer einzelnen Lunation macht es klar, daß der Mond ein dunkler, kugelförmiger Körper ist, der sein Licht von der Sonne empfängt; diese Tatsache ist schon im Altertume von sorgfältigen Beobachtern erkannt worden.

*) Man bezeichnet Tage, Stunden, (Zeit-)Minuten und (Zeit-)Sekunden kurz durch ^{d}, ^{h}, ^{m}, ^{s}, (^{d} = dies = Tag, ^{h} = hora = Stunde); Grade, (Bogen-)Minuten und (Bogen-)Sekunden durch °, ′, ″.

Wie die Sonne den Himmel in einem Jahre, so durchläuft der Mond ihn in etwas mehr als 27 Tagen. Seine Bewegung unter den Sternen kann man deshalb leicht wahrnehmen. Wird die Stellung des Mondes zu einem helleren Sterne, etwa um die Zeit des ersten Viertels, von Stunde zu Stunde notiert, so wird man bald finden, daß er im Laufe einer Stunde nahe um den Betrag seines Durchmessers nach Osten vorrückt. In der nächsten Nacht wird er schon 12° bis 14° östlicher als in der ersten stehen, etwa dreiviertel Stunde später aufgehen und um ebensoviel später den Meridian passieren und untergehen. Nach $27^d\ 8^h$ wird er unter den Sternen wieder da stehen, wo er zuerst gesehen wurde.

Gehen wir nun von der Stellung des Mondes zur Zeit des Neumondes aus, so wird er nach Ablauf von $27^1/_3$ Tagen zwar zu denselben Sternen, aber noch nicht zur Sonne zurückgekehrt, demnach noch nicht wieder Neumond geworden sein. Dies rührt daher, daß die Sonne in dieser Zeit weiter nach Osten vorgerückt ist, und diese Bewegung beträgt so viel,

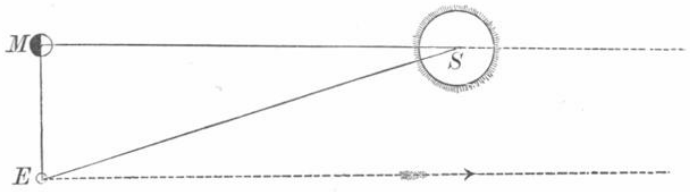


Fig. 5.

daß der Mond mehr als zwei Tage braucht, um die Sonne einzuholen und wieder Neumond zu werden. Die wahre oder *siderische Umlaufszeit* des Mondes um die Erde ist also $27^1/_3$ Tage; die Durchschnittszeit zwischen Neumond und Neumond, die Zeit also, nach welcher der Mond wieder in dieselbe Stellung zur Sonne kommt, oder die sogenannte *synodische Umlaufszeit*, beträgt dagegen $29^d\ 13^h$.

Eine Vergleichung der Mondphasen und der jedesmaligen Richtungen von Mond und Sonne zeigt, daß die letztere von uns außerordentlich viel weiter als der Mond entfernt ist. In Fig. 5 sei E die Erde oder die Stellung eines Beobachters auf ihr, M der Mond und S die Sonne, welche eine Hälfte des Mondes erleuchtet. Erscheint, wie in der Figur, dem Beobachter die Mondscheibe halb erleuchtet, oder ist erstes Viertel, so muß der Winkel am Monde zwischen Erd- und Sonnenrichtung ein rechter sein. Wäre nun die Sonne nur etwa viermal so weit entfernt als der Mond, so würde der Beobachter den Winkel SEM zu 75° finden; und je näher die Sonne wäre, desto kleiner würde er, für den Fall des ersten (oder letzten)

Viertels, werden. Die wirkliche Messung ergibt indessen auch diesen Winkel so nahe gleich 90°, daß der Unterschied in unvollkommenen Instrumenten unmerklich ist. Die Sonne steht nämlich in Wirklichkeit etwa an der Stelle, wo die punktierte Linie und die verlängerte Linie MS einander schneiden würden, d. i. etwa 400mal weiter, als die Entfernung EM beträgt.

Die Idee, durch Messung des Winkels SEM die Entfernung der Sonne oder vielmehr das Verhältnis der Sonnenentfernung zur Mondentfernung zu bestimmen, rührt von Aristarch (im 3. Jahrhundert v. Chr.) her. Durch Messung fand er den genannten Winkel, also den Unterschied der Richtung nach der Sonne und nach dem Monde, zu 87°, wonach die erstere etwa 20mal so weit entfernt sein würde als der letztere. Wir wissen jetzt, daß dieses Resultat 20mal zu klein, und daß der Winkel in der Tat so nahe 90° (89° 51′) ist, daß Aristarch den Unterschied unmöglich bestimmen konnte. Überhaupt ist diese Methode, wenn auch im Prinzip ganz richtig, doch in der Praxis nicht anwendbar. Die eine, aber unübersteigliche Schwierigkeit liegt darin, daß es wegen der Beschaffenheit der Mondoberfläche unmöglich ist, wahrzunehmen, wann der Mond genau halb erleuchtet, der Winkel EMS also gerade 90° ist.

Wenn wir den Weg des Mondes unter den Sternen verfolgen und auf einer Sternkarte einzeichnen, so finden wir, daß er nicht derselbe wie der der Sonne ist, daß also der Mond sich nicht in der Ekliptik bewegt; die Mondbahn ist vielmehr gegen die Ekliptik um etwa 5° geneigt. Die einander gegenüberliegenden Durchschnittspunkte von Mond- und Sonnenbahn heißen die *Mondknoten;* vom aufsteigenden Knoten (☊) bis zum niedersteigenden (☋) liegt die Mondbahn über oder nördlich, vom niedersteigenden bis zum aufsteigenden unter oder südlich von der Ekliptik.

Infolge einer Bewegung der Knoten gegen Westen, die für jeden Mondumlauf mehr als 1° beträgt, verändert sich aber die Lage der Mondbahn fortwährend; und so schneidet zwar die Bahn die Ekliptik stets unter demselben Winkel, sie verschiebt sich aber längs derselben um etwa 20° in einem Jahre, und der Mond geht daher nicht immer über dieselben Sterne hinweg. Im März 1896 z. B. kreuzte der Mond die Ekliptik im niedersteigenden Knoten in der Nähe des Regulus im Löwen. Infolge der regelmäßigen Veränderung der Durchschnitts- oder Knotenpunkte war aber der niedersteigende Knoten im Laufe von 9 bis 10 Jahren bis in den Wassermann gerückt, so daß sich 1905 der aufsteigende Knoten im Löwen befand. In einer Zeit von 18 Jahren 7 Monaten haben die Knoten einen vollen Umlauf vollendet, und die Bahn des Mondes liegt dann wieder

genau so, wie um dieselbe Zeit früher, mithin passiert im Jahre 1914 der Mond den niedersteigenden Knoten wieder im Sternbilde des Löwen.

6. Sonnen- und Mondfinsternisse.

Ohne Zweifel werden in den ältesten Zeiten die Menschen durch das gelegentliche und fast plötzliche Eintreten einer Finsternis in Schrecken und Furcht versetzt worden sein, wie dies ja noch heute bei unzivilisierten Völkern der Fall ist. Aber nicht lange konnten die Bewegungen von Sonne und Mond verfolgt werden, ohne daß man die Ursache dieser Erscheinungen fand. Vorgeschritteneren, mit der Natur und speziell den Himmelserscheinungen sich beschäftigenden Männern mußte klar werden, daß der Mond, wenn er zwischen Erde und Sonne tritt, uns einen Teil ihres Lichtes oder ihr ganzes Licht wegnimmt. Liefen beide Körper in derselben scheinbaren Bahn am Himmel, so müßte eine Sonnenfinsternis bei jedem Neumond eintreten; infolge der Neigung beider Bahnen gegeneinander geht aber der Mond im allgemeinen nördlich oder südlich an der Sonne vorbei, ohne eine Finsternis zu verursachen. Ist indessen der Mond zur Zeit des Neumondes auch zugleich in der Nähe eines Knotens, so wird eine Sonnenfinsternis stattfinden. Als ein Beispiel wollen wir den Weg beider Himmelskörper im Februar und März 1914 verfolgen. Die Sonne passiert den aufsteigenden Knoten der Mondbahn am 6. März und ist vom 15. Februar bis 26. März weniger als 20° von diesem Knoten entfernt. Der Mond geht an der Sonne vorbei, oder es ist Neumond, am 25. Februar 1 Uhr morgens und am 26. März 7 Uhr abends. An letzterem Tage steht er so weit nördlich von der Sonne, daß, vom Erdmittelpunkt aus (*geozentrisch*) gesehen, zwischen dem nördlichen Sonnen- und dem südlichen Mondrande ein Abstand von etwa $1^1/_2°$ bleibt, eine Finsternis also unmöglich ist. Dagegen findet am 25. Februar in der Tat eine (ringförmige) Sonnenfinsternis statt, da zur Zeit des Neumondes Sonne und Mond nur 10° vom Knoten abstehen und die Entfernung der Mittelpunkte daher verhältnismäßig gering ist; immerhin beträgt sie aber so viel (50′ geozentrisch), daß nur wegen der großen Parallaxe des Mondes eine Finsternis und zwar für die südlichsten Gegenden der Erde möglich ist. Jedesmal überhaupt, wenn die Sonne zur Zeit des Neumondes von einem der Knoten um nicht mehr als einen gewissen Betrag absteht, findet für irgendeinen Erdort eine wenigstens teilweise Bedeckung der Sonne oder eine partielle Sonnenfinsternis statt. Dieser Betrag hängt begreiflicherweise für den Erdmittelpunkt nur von der scheinbaren Größe von Sonne und Mond ab und ist etwa 19°. Da nun die Sonne im Laufe eines Jahres beide Knoten der

Mondbahn kreuzt, so müssen für die Erde überhaupt jährlich mindestens zwei Sonnenfinsternisse stattfinden.

Auch die Ursache der Mondfinsternisse konnte auf die Dauer nicht verborgen bleiben; man mußte, nach Beobachtung einer größeren Zahl und Notierung der Zeiten ihres Eintretens, bald bemerken, daß sie stets zur Zeit des Vollmondes sich ereigneten, wenn also die Erde auf der Verbindungslinie zwischen Mond und Sonne war. Die Idee, daß die Erde einen Schatten werfe und der Mond in diesen trete, wie bei einer Sonnenfinsternis die Erde in den Schatten des Mondes, lag dann nicht fern; und so finden wir in der Tat, daß man schon in den ältesten Zeiten auch mit der Ursache der Mondfinsternisse vollkommen vertraut war.

Der Grund, warum die Mondfinsternisse nur gelegentlich und nicht bei jedem Vollmond eintreten, ist wesentlich derselbe, wie der des seltenen Eintretens der Sonnenfinsternisse. Das Zentrum des Erdschattens liegt, wie das der Sonne, stets in der Ekliptik, und wenn daher der Mond zur Zeit des Vollmondes nicht gerade sehr nahe der Ekliptik, also nahe einem der Knoten ist, wird er nicht in den Schatten der Erde eintreten, sondern nördlich oder südlich davon vorbeigehen. Infolge der sehr bedeutenden Größe der Sonne (ihr Durchmesser ist mehr als 100mal so groß als der der Erde) ist der Kernschatten der Erde in der Entfernung des Mondes wesentlich kleiner als die Erde selbst. Hieraus folgt, daß eine Mondfinsternis einen beträchtlich geringeren Abstand des Mondes von einem seiner Knoten erfordert als eine Sonnenfinsternis. Mondfinsternisse treten daher seltener auf als Sonnenfinsternisse, und mitunter vergeht in der Tat ein ganzes Jahr ohne Mondfinsternis.

Die Natur und Dauer einer Finsternis ist je nach den Stellungen und scheinbaren Größen von Sonne und Mond verschieden. Wir wollen zuerst annehmen, bei einer Sonnenfinsternis ginge der Mond genau über den Mittelpunkt der Sonne weg (die Bedeckung sei zentral), er stände also zur Zeit des Neumondes genau in einem seiner Knoten. Dann ist klar, daß, wenn der scheinbare (Winkel-)Durchmesser des Mondes den der Sonne übertrifft, die letztere vollständig verdeckt sein wird; es findet sodann eine *totale Sonnenfinsternis* statt. Eine solche kann, wie leicht einzusehen, nur dann eintreten, wenn sich der Beobachter genau oder sehr nahe auf der (verlängerten) Verbindungslinie der Mittelpunkte von Sonne und Mond befindet. Ist unter den gleichen Verhältnissen die scheinbare Größe des Mondes geringer als die der Sonne, so ist klar, daß nicht die ganze Sonnenscheibe verdeckt werden kann, sondern noch ein

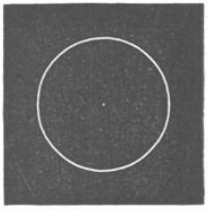


Fig. 6.

Lichtring um den Mondrand sichtbar sein wird; diese Erscheinung heißt eine *ringförmige* Sonnenfinsternis*) (Fig. 6). Geht der Mond nicht zentral über die Sonne weg, so kann er nur einen Teil derselben bedecken, und die Finsternis ist dann eine *partielle* (Fig. 7). Ebenso verhält es sich mit den Mondfinsternissen: ist der Mond nur teilweise im Erdschatten, so haben wir eine partielle Mondfinsternis; steht er ganz in ihm, eine totale. Eine ringförmige Mondfinsternis ist nicht möglich, weil der Durchmesser des Erdschattens den des Mondes stets übertrifft.

Fig. 7.

Die folgenden Figuren 8 und 9 zeigen einige der bei Finsternissen stattfindenden Verhältnisse deutlicher. S bezeichnet darin die Sonne, E die Erde, M den Mond. Ein Beobachter an den Punkten O (Fig. 8), überhaupt außerhalb der schraffierten Partien, würde die ganze Sonne, also gar keine Verfinsterung sehen. An den Stellen P, innerhalb der leicht schraffierten

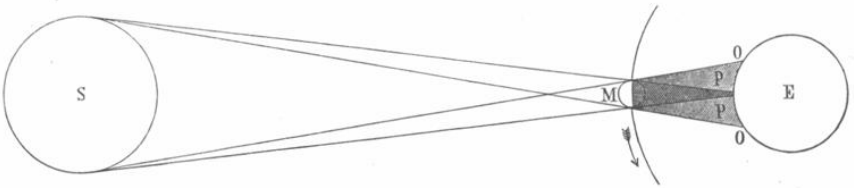


Fig. 8.

Teile, wird die Sonne partiell verfinstert erscheinen, und zwar um so mehr, je näher der Beobachter dem Zentrum ist. Dieser Teil des Schattenkegels heißt der Halbschatten. Endlich gibt es eine kleine Region, zwischen den mit P bezeichneten Stellen, wo die Sonne total vom Monde verdeckt ist; diese Gegend trifft der Kernschatten des Mondes, dessen Form ein Kegel ist mit der Basis am Mond und der Spitze an der Erde. Die scheinbaren Durchmesser von Sonne und Mond sind nun so nahe gleich, d. h. die wahren verhalten sich so nahe, wie die entsprechenden Entfernungen von der Erde, daß die Spitze des Mondschattens immer in der Nähe der Erde liegt; mitunter erreicht er die Erdoberfläche, die Orte im Schattenkegel haben dann eine totale Sonnenfinsternis, mitunter trifft er sie aber auch nicht,

*) Die Alten glaubten, daß der scheinbare Durchmesser des Mondes stets größer als der der Sonne sei und daß daher ringförmige Sonnenfinsternisse nicht eintreten könnten. Die erste ringförmige Finsternis, die als solche erkannt wurde, ist die vom 9. April 1567, die in Italien sichtbar war, und über deren Beobachtung Clavius berichtet. Aber noch Kepler suchte den bei dieser Finsternis gesehenen hellen Ring als eine Erscheinung der Erd- oder der Mondatmosphäre zu erklären.

dann findet eine ringförmige Finsternis statt. Da im Fall einer totalen Finsternis der Schattendurchmesser auf der Erde selbst selten mehr als 200 Kilometer beträgt, so begreift man, warum für einen gegebenen Erdort eine totale Sonnenfinsternis so selten eintritt und dann so kurz ist. Für einen genau auf der Zentrallinie gelegenen Ort ist die Dauer der Totalität um so länger, je größer der scheinbare Monddurchmesser im Verhältnis zum Sonnendurchmesser ist, je näher also der Mond und je entfernter die Sonne steht; sie beträgt aber selten mehr als 6 Minuten und kann im Maximum bis auf etwa 8 Minuten steigen. In der Mehrzahl der Fälle erreicht jedoch die Schattenspitze die Erde nicht; dann erscheint der Mond kleiner als die Sonne, und ein in der Zentrallinie befindlicher Beobachter sieht eine ringförmige Sonnenfinsternis, die gleichfalls nur ganz kurze Zeit, im Maximum ca. 12 Minuten, dauern kann. Die Phasen der partiellen Verfinsterungen sowie die partiellen Finsternisse überhaupt dauern begreiflicherweise erheblich länger, da, wenn der Mond nur nahezu zentral an der Sonne vorbeigeht, zwischen erster Berührung im Westen (Anfang der Finsternis) und letzter Berührung im Osten (Ende) mehrere Stunden verfließen.

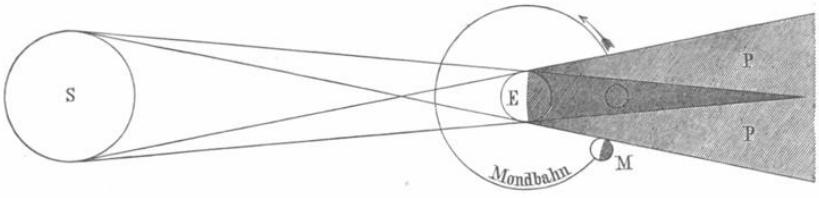


Fig. 9.

Der Mondschatten oder seine Verlängerung trifft die Erdoberfläche zuerst an westlichen Orten, da der Mond in west-östlicher Richtung die Sonne passiert; in einem Zeitraume von 4 bis 5 Stunden überstreicht er dann etwa 120° in Länge und verläßt die Erde in östlicheren Gegenden. Für die vom Schatten zuerst getroffenen Punkte geht in diesem Moment die Sonne gerade auf, für die zuletzt getroffenen geht sie unter.

Fig. 9 zeigt die Form des Erdschattens und die Verhältnisse bei einer totalen Mondfinsternis. Da der Durchmesser der Erde nahe viermal so groß ist als der des Mondes, so ist auch ihr Schatten etwa viermal so lang als der Mondschatten und, wo er die Mondbahn schneidet, erheblich größer als der Monddurchmesser; der Mond kann also, wie in der Figur dargestellt ist, vollkommen durch den Schatten bedeckt werden. Wir wollen nun annehmen, der Mond passiere den Schatten der Erde zentral. Sobald er

in den Halbschatten P tritt, beginnt eine Mondfinsternis — ein Mondbewohner sieht eine partielle Sonnenfinsternis, verursacht durch das Vortreten der Erde —; die Erscheinung wird aber erst auffällig, wenn der Mond in die Nähe des Kernschattens kommt. Tritt er nach etwa einer Stunde in denselben, so scheint ein Stück wie abgeschnitten und mitunter selbst gänzlich verschwunden zu sein. Die Verfinsterung nimmt nun stetig zu; endlich ist der Mond ganz in den Kernschatten eingetreten, und damit beginnt die totale Finsternis. Nach etwa $2^1/_2$ Stunden erreicht er den östlichen Rand des Kernschattens, womit die totale Finsternis endet, und nach einer weiteren Stunde auch die östliche Grenze des Halbschattens, womit die ganze Erscheinung ihr Ende findet. Während der totalen Verfinsterung ist der Mond selten ganz unsichtbar; gewöhnlich erscheint er in einer mehr oder weniger lebhaften kupferroten Farbe. Dieses matte rote Licht ist eine Folge der in den Kernschatten durch die Erdatmosphäre gebrochenen Sonnenstrahlen, und es ist heller oder matter, je nach den atmosphärischen Verhältnissen der von den Sonnenstrahlen berührten Randstellen der Erde.

Bei etwa der Hälfte aller Mondfinsternisse geht der Mond so weit über oder unter dem Zentrum des Erdschattens weg, daß auch zur Zeit der größten Verfinsterung nur ein Teil im Kernschatten steht; wir haben dann eine partielle Mondfinsternis. Bleibt der Mond ganz im Halbschatten und berührt den Kernschatten überhaupt nicht, so hat man eine *Penumbrafinsternis*. Dieselbe ist so wenig augenfällig, daß sie meist unbeachtet vorübergehen wird. Übrigens ist ersichtlich, daß die Mondfinsternisse stets an allen Orten wahrgenommen werden, wo gerade der Mond über dem Horizont steht; sie sind eine reale, objektive Erscheinung, da der Mond wirklich durch den Erdschatten hindurchgeht. Für einen speziellen Erdort sind darum Mondfinsternisse häufiger als Sonnenfinsternisse, für die Erde im allgemeinen treten dagegen, wie oben bereits auseinandergesetzt wurde, Sonnenfinsternisse häufiger ein als Mondfinsternisse.

Die Größe einer Finsternis maßen die älteren Astronomen nach »Zollen« (digiti), welche Benennung übrigens auch heute noch mitunter in Gebrauch ist. Sie teilten den Durchmesser der Sonnen- oder Mondscheibe in 12 gleiche Teile, Zolle genannt, und die Größe der Finsternis war gleich der Anzahl der Zolle, die das verfinsterte Stück betrug, also z. B. 12, wenn die Finsternis eine totale, 6, wenn Sonne oder Mond zur Hälfte verfinstert war. Die meisten Astronomen des Altertums pflegten indessen die digiti auf die Oberfläche zu beziehen und nicht auf den Durchmesser; war z. B. der Mond vier digiti verfinstert, so hieß dies, daß ein Drittel seiner Oberfläche und nicht seines Durchmessers verfinstert war.

Totale Sonnenfinsternisse bieten seltene, aber um so höher geschätzte Gelegenheit, die Vorgänge in den Lichthüllen der Sonne zu studieren; hiervon werden wir in einem späteren Kapitel sprechen.

Kehren wir jetzt zu den scheinbaren Bewegungen von Sonne und Mond an der Himmelskugel zurück. Da die Mondbahn zwei gegenüberliegende Knoten hat, in denen sie die Ekliptik schneidet, und da die Sonne die ganze Ekliptik in einem Jahre durchläuft, so folgt, daß es zwei Perioden im Jahre gibt, während welcher die Sonne einem Knoten nahe ist und daher Finsternisse vorkommen können. Beiläufig umfassen diese Perioden, die man Finsternisperioden nennen könnte, etwa je einen Monat. Im Jahre 1914 fällt z. B. die erste Finsternisperiode auf die Zeit von Mitte Februar bis Mitte März, die zweite von Mitte August bis Mitte September, und in der Tat treten 1914 zwei Sonnenfinsternisse und zwei Mondfinsternisse ein, von denen die erste Mondfinsternis und die zweite Sonnenfinsternis für unsere Gegenden sichtbar sind. Die Zeiten dieser Finsternisse fallen, entsprechend den obigen Perioden, auf Februar 25 (ringförmige Sonnenfinsternis); März 12 (partielle Mondfinsternis); August 21 (totale Sonnenfinsternis) uud September 4 (partielle Mondfinsternis).[1]

Genauer beträgt die durchschnittliche Periode für Sonnenfinsternisse 36 Tage (18 Tage vor und 18 Tage nach ihrem Durchgang durch einen Knoten), für Mondfinsternisse dagegen nur 23 Tage. Wegen der schon beschriebenen Bewegung der Mondknoten tritt die Finsternisperiode nicht jedes Jahr zu gleicher Zeit ein, sondern durchschnittlich in jedem folgenden Jahre etwa 20 Tage früher. Die Wirkung dieses konstanten Fortrückens der Knoten und der Finsternisperioden ist, daß z. B. im Jahre 1923 die Februar-Märzperiode von 1914 zurück in die August-Septemberperiode und umgekehrt gerückt sein wird.

Es gibt zwischen den Bewegungen der Sonne und des Mondes eine Beziehung, deren Kenntnis den alten Astronomen die Vorhersagung der Finsternisse wesentlich erleichterte. Wir erwähnten oben (S. 18), daß der Mond einen Umlauf in Beziehung auf die Sterne in etwa $27\,^1/_3$ Tagen vollendet. Da die Knoten seiner Bahn gleichmäßig rückwärts, der Mondbewegung entgegen, weiterrücken, so kehrt er zum Knoten in etwas weniger als der genannten Zeit zurück, nämlich in 27.2122 Tagen. Die Sonne ihrerseits erreicht, nach Passierung eines Knotens der Mondbahn, denselben abermals nach 346.6201 Tagen. Die Beziehung zwischen den letzteren beiden Zahlen ist nun die, daß 242 Mondumläufe in bezug auf den Knoten (die sogenannte *drakonitische* Umlaufszeit) sehr nahe gleich 19 hierauf bezogenen Sonnenumläufen sind; streng sind:

242 drakonitische Mondumläufe . . . . . 6585.357 Tage,
19 » Sonnenumläufe . . . . 6585.780 »

Gehen demnach Sonne und Mond zu irgendeiner Zeit zugleich vom Knoten aus, so werden sie sich nach 6585 Tagen sehr nahe wieder bei demselben Knoten befinden. Während dieses Intervalls würden 223 Lunationen oder Neu- und Vollmonde, keiner aber so nahe am Knoten als der erste und der letzte, stattgefunden haben. Die genaue Zeit für 223 Lunationen ist 6585.3212 Tage, so daß in dem angenommenen Falle das 223 ste Zusammentreffen (Konjunktion) von Sonne und Mond etwas vor Erreichung des Knotens stattfinden würde, in einer Entfernung, die nach der Rechnung 28′ oder etwas weniger als einen der Durchmesser beträgt. Befanden sie sich am Anfange der eben betrachteten Zeit nicht genau im Knoten, sondern in einer gewissen Distanz von demselben, z. B. 3° östlich oder westlich, so werden sie dementsprechend nach Ablauf der Periode auch innerhalb eines halben Grades von diesem 3° östlichen oder westlichen Punkte wieder zusammentreffen.

Die eben betrachtete Periode heißt der *Saroszyklus* und kann in folgender Weise angewandt werden: Man notiert die genaue Zeit der Mitte einer Mond- oder Sonnenfinsternis, rechnet dann $6585^{d}\ 7^{h}\ 42^{m}$ vorwärts und findet so eine andere Finsternis von sehr nahe derselben Art. Auf Jahre reduziert wird das Intervall 18 Jahre und 10 oder 11 Tage, je nachdem der 29. Februar vier oder fünfmal in dieser Zeit vorgekommen ist. Notieren wir nun alle Finsternisse in der Zeit von 18 Jahren, so sehen wir dieselbe Reihe nach dieser Zeit, jedoch 10 oder 11 Tage später, wiederkehren; aber die neue Serie wird im allgemeinen nicht an denselben Orten wie die alte oder wenigstens nicht zu derselben Tageszeit sichtbar sein, da die Mitte der Finsternis etwa $7\,^{3}/_{4}$ Stunden später fällt. Erst nach dem Ende von drei Perioden werden die Finsternisse wieder nahe zur selben Zeit stattfinden, dann aber, da die Periode etwas kleiner, nämlich $6585\,^{1}/_{3}$ Tage ist, nicht genau von derselben Größe sein und mitunter sogar ganz ausbleiben. Da nach dem obigen jede folgende Finsternis am Ende der Periode 28′ weiter zurück, relativ zum Knoten, fällt, so muß die Konjunktion im Laufe der Zeit so weit ab vom Knoten eintreffen, daß überhaupt keine Finsternis mehr möglich wird. Während beinahe jeder Periode wird man finden, daß einige Finsternisse fehlen, andere neu eintreten. Eine neu eintretende Mondfinsternis z. B. wird zunächst sehr klein sein; bei jeder folgenden periodischen Wiederkehr, also nach je 18 Jahren, wird sie größer, bis sie, bei ihrem 13. Wiedereintreten etwa, total wird. Dies bleibt sie 22 oder 23 mal und wird dann wieder partiell, aber auf der der früheren entgegengesetzten Seite

des Mondes. Hierauf folgen wiederum etwa 13 immer kleiner werdende partielle Finsternisse, bis sie zuletzt ganz ausbleiben. Das ganze Intervall, über welches sich demgemäß die Wiederkehr einer Mondfinsternis ausbreitet, ist etwa 48 Perioden oder $865\frac{1}{2}$ Jahre. Die Sonnenfinsternisse, die weiter vom Knoten eintreten (S. 20), erhalten sich länger, nämlich 65 bis 70 Perioden hindurch oder über 1200 Jahre.

Als ein der neueren Zeit entnommenes Beispiel des Saroszyklus erwähnen wir die folgenden totalen Sonnenfinsternisse*):

1842 Juli 8, $8^h\,3^m$ a. m., Europa, Asien;
1860 Juli 18, $3^h\,21^m$ p. m., Nordamerika, Spanien, Afrika;
1878 Juli 29, $10^h\,41^m$ p. m., Nordamerika, Ostsibirien.

Eine noch merkwürdigere Folge totaler Sonnenfinsternisse ist diese:

1850 August 7, $10^h\,34^m$ p. m., Stiller Ozean;
1868 August 18, $6^h\,12^m$ a. m., Indien;
1886 August 29, $1^h\,54^m$ p. m., Atlantischer Ozean, Südafrika;
1904 September 9, $9^h\,43^m$ p. m., Stiller Ozean, Südamerika;
1922 September 21, $5^h\,38^m$ a. m., Australien.

Diese Reihe ist durch die lange, zu mehr als 6^m ansteigende Totalitätsdauer bemerkenswert; sie läßt sich viele Jahrhunderte hindurch verfolgen.

Die verschiedenen in diesem Abschnitt erwähnten Zahlen sind nicht in allen Fällen vollkommen genau, weil die Bewegungen sowohl der Sonne, als auch des Mondes gewissen kleinen Unregelmäßigkeiten unterliegen, welche die Finsterniszeiten um eine Stunde und mehr ändern können. Wir haben nur mittlere Werte gegeben, die indessen immer der Wahrheit sehr nahe kommen.

Wie wir später sehen werden, sind von wesentlichem Interesse heute nur noch die totalen Sonnenfinsternisse, von welchen wir in diesem und dem nächsten Jahrzehnt noch die folgenden zu erwarten haben:

1914 August 21 ($2^m.4$) Skandinavien, Rußland, Asien;
1916 Februar 3 ($2^m.9$) Südamerika, Westindien;
1918 Juni 8 ($2^m.5$) Nordamerika;
1919 Mai 29 ($6^m.1$) Südamerika, Afrika;
1922 September 21 ($6^m.4$) Indischer Ozean, Australien;
1923 September 10 ($3^m.8$) Großer Ozean, Nordamerika, Atlant. Ozean;

*) Die angeführten Zeiten gelten für die wahren ekliptischen Konjunktionen und sind in mitteleuropäischer Zeit gegeben; die Zusätze a. m. = ante meridiem und p. m. = post meridiem dienen zur Kennzeichnung der Vormittags- und Nachmittagsstunden.

1925 Januar 24 (3^m3) Nordamerika, Atlantischer Ozean;
1926 Januar 14 (4^m4) Afrika, Sundainseln;
1927 Januar 3 (0^m1) Großer Ozean;
1927 Juni 29 (1^m0) England, Skandinavien, Sibirien;
1929 Mai 9 (5^m5) Indischer Ozean, Sumatra, Philippinen.

Die in Klammern angegebenen Zahlen bedeuten die Dauer der Totalität, in Minuten ausgedrückt.

Die totalen Sonnenfinsternisse sind also, wenn man die ganze Erde in Betracht zieht, ziemlich häufig; im 20. Jahrhundert finden im ganzen 80 statt. Für ein bestimmtes Land aber bilden sie stets eine seltene Erscheinung, und ein einzelner Ort kann nur etwa alle 200 Jahre auf ein solches Ereignis rechnen. In Deutschland z. B. sind im 19. Jahrhundert drei totale Sonnenfinsternisse zu beobachten gewesen (1816 November 19; 1851 Juli 28; 1887 August 19), und im 20. werden es sogar nur zwei sein (1954 Juni 30; 1999 August 11). Berlin aber wird in diesen beiden Jahrhunderten nur einmal (1887 August 19) Gelegenheit gehabt haben, das herrliche Schauspiel zu erblicken.

7. Das Ptolemäische Weltsystem.

Es existiert heute noch ein Werk, welches für 14 Jahrhunderte eine Art astronomische Bibel war, von dem nichts weggenommen und zu dem im Prinzip nichts hinzugefügt wurde. Dies ist der »Almagest«*), der etwa in der Mitte des 2. Jahrhunderts n. Chr. von dem alexandrinischen Astronomen Ptolemäus unter Benutzung älterer Beobachtungen, besonders des Hipparch, verfaßt worden ist. Fast alles, was wir von der astronomischen Wissenschaft der Griechen wissen, ist aus ihm entnommen. Zwar sind auch Fragmente von Werken anderer alter Autoren auf uns gekommen, und die meisten alten Schriftsteller spielen gelegentlich auf astronomische Erscheinungen und Theorien an, woraus man sich einige Vorstellungen über die Astronomie des Altertums hat bilden können; aber das Werk des Ptolemäus ist das einzige vollständige Hand- und Lehrbuch, welches wir besitzen. Obgleich sein System in vielen wichtigen Punkten irrig ist, stellt es doch die Form der scheinbaren Bewegungen der Himmelskörper im allgemeinen mit großer Genauigkeit dar. Mangelhaft immerhin, wenn mit unserem Maße gemessen, ist es für jene Zeiten ein wundervolles Zeugnis von Scharfsinn und Forschungsgabe.

Gegenstand des vorliegenden Kapitels sind die scheinbaren Be-

*) Von den Arabern korrumpiert aus: ἡ μεγάλη σύνταξις.

wegungen der Planeten, deren Erklärung am einfachsten mit Hilfe des Ptolemäischen Systems gegeben werden kann. Mit Rücksicht auf sein geschichtliches Interesse wollen wir indessen erst kurz die Grundsätze und Vorstellungen skizzieren, auf denen das System beruht, und ebenso die Beweismethode des Ptolemäus anführen. Seine, in der Hauptsache, wie erwähnt, dem Hipparch und dessen Vorläufern entnommenen Fundamentalsätze sind, daß alle Himmelskörper sich in Kreisen an der Himmelssphäre bewegen, daß die gleichfalls sphärische Erde im Mittelpunkte des Weltalls oder des Himmels ruht, und daß sie im Vergleich zu der Sphäre der Gestirne nur ein Punkt ist.

1. Die Himmelskörper bewegen sich in Kreisen. — Ptolemäus spricht hier zunächst von der täglichen Bewegung, infolge deren jeder Himmelskörper scheinbar rund um die Erde oder vielmehr in kreisförmigem täglichem Lauf um den Himmelspol geführt wird. Die Astronomen des Altertums und Mittelalters bis zu Keplers Zeit meinten, alle himmlischen Bewegungen fänden in Kreisen als den vollkommensten ebenen Figuren statt; da aber die Ungleichförmigkeit vieler dieser Bewegungen bald erkannt wurde, nahmen sie an, daß die Erde nicht in dem Mittelpunkte dieser Kreise sei. Wo ein einzelner Kreis nicht genügte, die Bewegung eines Himmelskörpers darzustellen, führten sie eine Kombination kreisförmiger Bewegungen ein, über die wir sogleich sprechen werden.

2. Die Erde ist eine Kugel. — Daß die Erde von Osten nach Westen gerundet ist, beweist Ptolemäus, wie schon Aristoteles vor ihm, aus der Tatsache, daß die Gestirne nicht zu ein und demselben Zeitpunkte für alle Erdbewohner auf- und untergehen. Durch Vergleichung der Zeiten, zu denen eine Mondfinsternis in verschiedenen Gegenden gesehen wird, findet man, daß dies zu einer um so früheren Stunde nach Sonnenuntergang der Fall ist, je weiter westlich sich der Beobachter befindet. Da nun in der Tat die Zeit einer solchen Erscheinung überall dieselbe ist, so folgt daraus, daß die Sonne um so später untergeht, je weiter wir nach Westen kommen. Wäre ferner die Erde nicht von Norden nach Süden gerundet, so müßte ein Stern, der an einem Orte den Meridian im Nord- oder Südhorizont passiert, dies überall tun, wie weit nach Norden oder Süden der Beobachter auch reist. Aber man sieht beim Reisen nach Süden die Sterne im Norden sich dem Horizont nähern (vgl. S. 10), während neue Gestirne über dem Südhorizont heraufsteigen. Dies zeigt, daß der Horizont selbst mit der Bewegung des Beobachters Lage und Richtung ändert. Weiter bleibt, von welcher Seite auch wir uns hohen Gegenständen von der See aus nähern, ihre Basis anfangs infolge der Krümmung der Meeresoberfläche verborgen und wird erst allmählich bei

weiterer Annäherung sichtbar. Und so ließen sich noch andere Erscheinungen anführen, woraus schon die Alten auf die Kugelgestalt der Erde schließen konnten und schlossen.

3. Die Erde steht im Mittelpunkte der Himmelskugel. — Stände die Erde außerhalb dieses Mittelpunktes, so müßten verschiedene Unregelmäßigkeiten in der scheinbaren täglichen Drehung der Himmelskugel stattfinden, indem die Sterne an der Seite, nach welcher die Erde läge, schneller bewegt erscheinen würden. Befände sie sich östlich vom Mittelpunkte, so würden wir den aufgehenden Himmelskörpern näher sein als den untergehenden, und die Gestirne würden sich im Osten scheinbar rascher bewegen als im Westen. Da keine solchen Unregelmäßigkeiten wahrgenommen werden, die tägliche Bewegung vielmehr mit vollkommener Gleichförmigkeit vor sich geht, so muß die Erde im Zentrum der Bewegung stehen.

4. Die Erde hat keine fortschreitende Bewegung. — Hätte sie eine solche, so würde sie sich von dem Zentrum fort nach einer Seite der Himmelskugel hin bewegen, und die tägliche Umdrehung der Gestirne müßte aufhören, in allen Teilen gleichförmig zu sein. Da aber die eben erwähnte Gleichförmigkeit der Bewegung Jahr für Jahr wahrgenommen wird, so muß die Erde ihre Stellung im Mittelpunkte der Sphäre beibehalten.

Es wird interessant sein, diese Grundsätze des Ptolemäus zu analysieren, um zu sehen, was an ihnen wahr und was falsch ist. Der erste Satz, daß sich die Himmelskörper in Kreisen bewegen, ist, soweit die scheinbare tägliche Bewegung in Betracht kommt, vollkommen wahr. Ptolemäus wußte aber nicht, daß diese Bewegung eben nur eine scheinbare ist und von der Rotation der Erde selbst um ihre Achse herrührt. Der zweite Satz ist durchaus richtig, und die Beweise des Ptolemäus für die Kugelgestalt der Erde werden, neben anderen, noch heutzutage in unseren Schulbüchern gefunden. Sehr auffallend aber ist die Mischung von Wahrheit und Irrtum im dritten und vierten Satze, daß die Erde in Ruhe bleibe. Als unbedingt falsch können wir auch diese Sätze nicht betrachten, weil man in einem gewissen Sinne, und zwar in dem einzigen, in welchem es eine Himmelskugel gibt, in der Tat sagen kann, die Erde bleibe im Mittelpunkte der Sphäre. Nur sah Ptolemäus nicht ein, daß diese Sphäre bloß eine gedachte ist, die der Beobachter mit sich führt, wohin immer er geht. Sein Beweis, daß das Zentrum der Himmelsumdrehung in der Erde liege, ist in gewissem Sinne richtig; aber was er wirklich beweist, ist, daß die Erde sich um ihre Achse dreht. Er sah nicht, daß, wenn die Erde die Umdrehungsachse in unveränderter Rich-

tung mit sich trägt, sein Beweis für die Ruhe der Erde zu nichte werden muß.

Man erhält einen klaren Begriff von den Anschauungen des Ptolemäus durch seine Antworten auf zwei Einwürfe gegen sein System. Der erste ist der gewöhnliche und natürliche, daß es paradox sei, anzunehmen, ein Körper wie die Erde könne, von nichts unterstützt, im Raume ruhig schweben. Diese Gegner, sagt er, urteilen nach dem, was sie bei kleinen Körpern rund um sich zufällig sehen, und nicht nach dem, was dem Universum eigentümlich ist. In den Himmelsräumen gibt es weder oben noch unten; denn wir können bei einer Sphäre davon nicht sprechen. Was wir unten nennen, ist einfach die Richtung unserer Füße nach dem Mittelpunkte der Erde, die Richtung, in der schwere Körper zu fallen streben. Die Erde selbst ist nur ein Punkt im Vergleiche mit dem Himmelsraum, und sie wird festgehalten durch die Kräfte, welche von dem unendlich größeren Universum auf sie ausgeübt werden. Diese Vorstellung nähert sich der der allgemeinen Gravitation so sehr, als es das Wissen der damaligen Zeit zuließ.

Ptolemäus sagt dann, es gäbe andere, die seine Schlußweise zwar zuließen, aber behaupteten, nichts hindere, anzunehmen, daß der Himmel unbeweglich sei, dagegen die Erde selbst sich einmal im Tage, von Westen nach Osten, um eine eigene Achse drehe. Es ist sicher sonderbar, daß jemand, der sich über die Illusion der Sinne soweit erhoben hatte, daß er der Welt beweisen konnte, die Erde sei rund, der Begriff von oben und unten sei relativ, und schwere Körper fielen nach einem Zentrum und nicht nach einer unveränderlichen Richtung, nicht die Richtigkeit jener Anschauung eingesehen hat.

Um die Hypothese der Erdrotation zurückzuweisen, geht er indessen auf einem Wege vor, der dem gerade entgegengesetzt ist, auf welchem er die Ansicht zurückweist, die Erde könne nicht ohne Unterstützung im Raume schweben. Zu den Vertretern dieser Ansicht sagt er, sie betrachteten nur die sie umgebende Erde und nicht das große Universum. Den Anhängern der Rotation der Erde aber erwidert er, daß, wenn wir nur die Bewegungen der Gestirne betrachten, dieser Lehrmeinung, die den Vorzug der Einfachheit habe, nichts entgegenzuhalten sei; aber mit Rücksicht auf das, was rund um uns und in der Luft geschähe, sei sie nur lächerlich. Er geht dann, in Aristotelischem Geiste, an eine äußerst unklare und verworrene Untersuchung über die relative Bewegung leichter und schwerer Körper und schließt, daß, wenn die Erde in der Tat mit der enormen Geschwindigkeit rotiere, die erforderlich sei, sie in einem Tage rundum zu führen, die Luft dann zurückgelassen werden müsse. Auf den Einwurf,

die Erde führe die Luft mit sich herum, erwidert er, daß dies für Körper, die in der Luft fliegen, nicht richtig sein könne, und schließt daraus, daß die Lehre von der Erdrotation nicht aufrecht zu erhalten sei. Nach dieser Argumentation ist es klar, daß Ptolemäus und seine Zeitgenossen notwendig die Lehre von der Erdrotation hätten als richtig erkennen müssen, wenn sie auf die Experimentalphysik nur halb so viel Eifer und Sorgfalt verwandt hätten, als wir in ihren astronomischen Arbeiten finden.

Im Ptolemäischen Weltsystem werden alle Bewegungen durch eine Reihenfolge von Kreisbewegungen dargestellt. Wir haben die Bewegungen von Sonne und Mond unter den Sternen bereits auseinandergesetzt; die erstere umkreist den Himmel von Westen nach Osten im Laufe eines Jahres, letzterer in ähnlicher Weise im Laufe eines Monats. Obschon nicht ganz gleichförmig, geschehen doch diese Bewegungen immer in demselben Sinne. Anders aber verhält es sich mit den fünf den Alten bekannten *Planeten**) Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Diese bewegen sich bald nach Osten, bald nach Westen, bald stehen sie relativ zu den Sternen still. Im ganzen herrschen indessen die östlichen Bewegungen vor, und die Planeten oszillieren in der Tat um einen gewissen mittleren Punkt, der selbst in regelmäßiger Bewegung gegen Osten ist. Nimmt man z. B. einen fingierten Jupiter an, der in stetiger Bewegung gegen Osten einen Umlauf unter den Sternen am Himmel in 12 Jahren vollendet, gerade wie ihn die Sonne in einem Jahre vollführt, so wird man den wirklichen Jupiter, wie ein Pendel, zu beiden Seiten des fingierten, aber nie weiter als 12°, sich hin und her bewegen sehen. Die Zeitdauer jeder doppelten Oszillation ist etwa 13 Monate, das heißt, wenn der wirkliche Jupiter den fingierten z. B. am 1. Januar nach Westen zu passiert hat, so setzt er seine Schwingung nach Westen etwa drei Monate fort, steht dann allmählich still und kehrt mit etwas langsamerer Bewegung zum fingierten Planeten zurück, den er, nach Osten, Mitte Juli passiert. Das Ausschwingen nach Osten wird bis gegen Ende Oktober dauern, wo er wieder gegen Westen umkehrt. Die westliche Bewegung heißt *retrograd* oder *rückläufig*, die östliche *direkt* oder *rechtläufig*; zwischen beiden liegt ein Punkt, wo der Planet in Ruhe oder *stationär* erscheint. Die westlichen Bewegungen heißen retrograde, weil sie sowohl der Bewegung der Sonne unter den Sternen als der allgemeinen Bewegungsrichtung der Planeten selbst entgegengesetzt gerichtet sind. Schon Hipparch bemerkte drei Jahrhunderte vor Ptolemäus, daß diese oszillierende Bewegung durch die Annahme erklärt oder dargestellt werden könne, der wirkliche Jupiter beschreibe im Laufe eines Jahres eine kreisförmige Bahn um den fingierten. Dieser

*) *πλανήτης*, umherirrend; *ἄστρα πλανητά*, umherschweifende Gestirne.

Kreis wurde der *Epizykel* genannt, und wir haben so die berühmte Epizykeltheorie der planetarischen Bewegungen, die im Almagest niedergelegt ist. Die Bewegung eines Planeten nach dieser Theorie wird aus Fig. 10 ersichtlich. *E* ist die Erde, um welche sich der fingierte Jupiter in dem punktierten Kreise 1, 2, 3 . . . 9 bewegt. Um den Epizykel, in welchem der wirkliche Planet läuft, zu bilden, müssen wir annehmen, ein Arm, der Radius des Epizykels, an dessen Ende der wirkliche Jupiter sich befinde, drehe sich gleichmäßig und einmal im Jahre um den fingierten Planeten. Dieser Arm wird also nacheinander die Stellungen 1 1′, 2 2′, 3 3′ . . . 9 9′ haben. Legt man dann eine Kurve durch die aufeinanderfolgenden Stellungen 1′, 2′, 3′ . . . 9′ des wirklichen Jupiter, so erhält man eine Reihe von Schlingen oder Schleifen, die seinen scheinbaren Lauf darstellen.

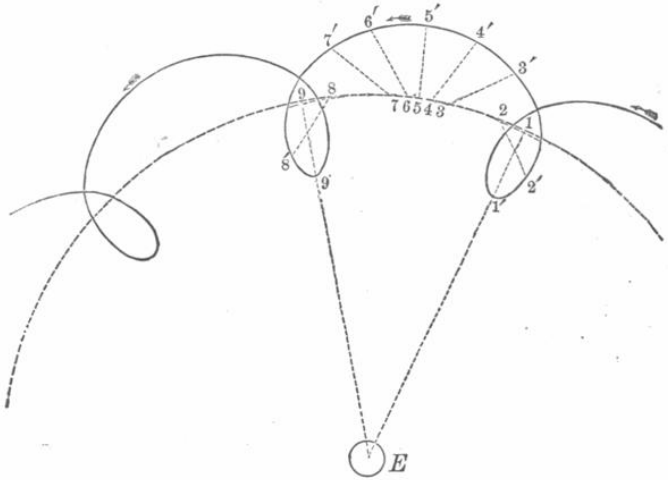


Fig. 10. Epizyklische Bewegung eines Planeten.

Es ist leicht zu sehen, daß, obschon nur ein Jahr für die Bewegung des den Jupiter (in der Vorstellung) tragenden Armes erforderlich ist, um eine vollständige Umdrehung zu vollenden und zu seiner Anfangsrichtung zurückzukehren, zur Bildung einer vollständigen Schleife doch mehr und zwar etwa 13 Monate nötig sind, weil der Arm, wegen der fortschreitenden Bewegung des fingierten Planeten, mehr als eine ganze Revolution machen muß, um die Schleife zu vollenden. So hat z. B. (Fig. 10) bei der Stellung 8 8′ der Arm oder Radius eine ganze Umdrehung in Beziehung zur Richtung 1 1′ gemacht, denn 8 8′ ist parallel zu 1 1′; aber er erreicht, wegen der Krümmung der Bahn, erst in der Stellung 9 9′ die Mitte der zweiten Schleife. Aus der Figur sieht man auch, daß sich der

Planet in der Nähe von 1′ rückwärts bewegt und bei 2′ stationär ist. Bald hinter 2′ wird die Bewegung direkt und bleibt so bis in die Nähe von 8′, wo der Planet zum zweiten Male stationär ist. Dann wird er wieder rückläufig, und der ganze Vorgang beginnt von neuem. Die Fig. 11 zeigt die vollständigen scheinbaren Bahnen des Jupiter und des Saturn (nach Aragos Astronomie). Außer diesen macht nur noch der Radius (Arm) des Mars-Epizykels eine Umdrehung in einem Jahre, der von Merkur und Venus dagegen nicht. Ist der Planet in *Opposition* mit der Sonne, oder

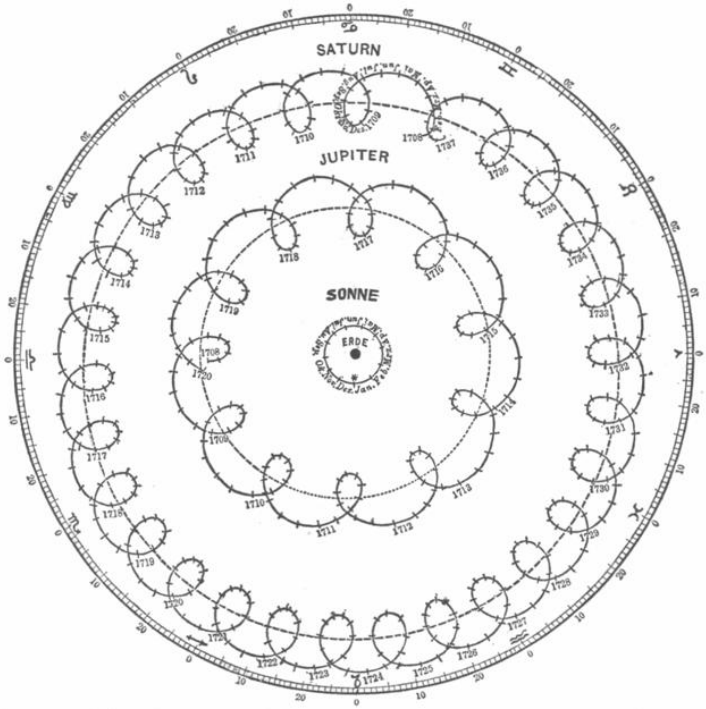


Fig. 11. Scheinbare (epizyklische) Bewegung von Jupiter und Saturn.

steht die Erde in der Verbindungslinie Planet-Sonne, so zeigt der Radius nach der Erde (11′, 99′ in Fig. 10); ist der Planet dagegen in *Konjunktion* mit der Sonne, oder steht die Sonne in der Verbindungslinie Erde-Planet, so zeigt der Radius von der Erde weg (55′). Den Astronomen des Altertums war diese Tatsache wohl bekannt, und sie gründeten in der Tat alle ihre Berechnungen der Planetenbewegungen hierauf; aber sie scheinen den sehr wichtigen Umstand nicht bemerkt zu haben, daß die Richtung des Epizykelradius der genannten drei Planeten stets die gleiche ist wie die Richtung von der Erde nach der Sonne. Hätten sie dies bemerkt, so würde

ihnen kaum entgangen sein, daß die Epizykel durch die Annahme, die Erde bewege sich um die Sonne und nicht die Sonne um die Erde, gänzlich vermieden werden können.

Die Eigentümlichkeit der Bewegungen von Merkur und Venus besteht darin, daß die fingierten Mittelpunkte, um die sie oszillieren, stets in der Richtung der Sonne liegen, da, wie wir jetzt wissen, die Sonne selbst der Mittelpunkt ihrer Bewegungen ist. Man sieht sie nie weiter als in einer bestimmten Entfernung zu beiden Seiten der Sonne, Venus etwa 45°,

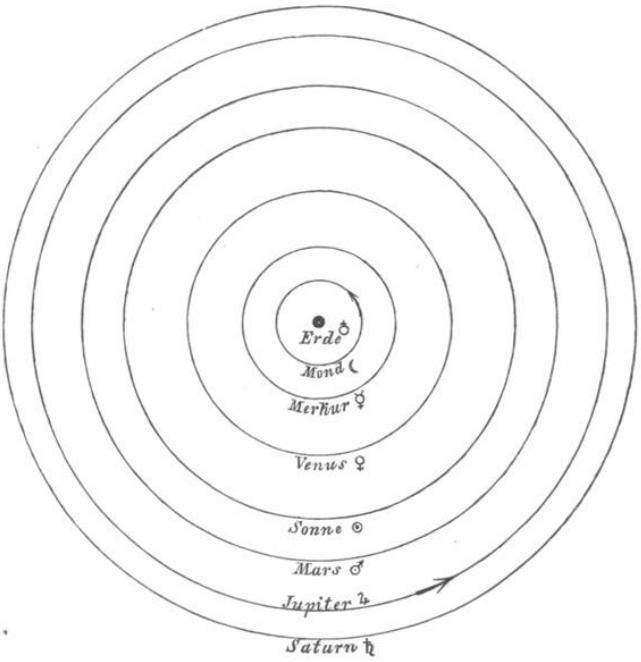


Fig. 12. Weltsystem nach Ptolemäus.

Merkur 16 bis 29°. Die alten Ägypter sollen in der Tat schon die Sonne zum Zentrum der Bewegungen dieser beiden Planeten gemacht haben, und man sieht schwer ein, wie jemand nach Erkenntnis der Regeln ihrer Oszillation etwas anderes tun konnte. Ptolemäus jedoch verwarf dieses System und nahm ohne stichhaltigen Grund an, daß ihre Bahnen zwischen Sonne und Erde lägen.

Fig. 12 zeigt nun die Anordnung der Planeten nach dem Ptolemäischen System. Der der Erde nächste Himmelskörper ist der Mond, dessen Entfernung den Alten, wenngleich nur roh, zu bestimmen gelang. Die Planeten folgen dann in derselben Ordnung wie in der Wirklichkeit, nur

muß die Erde an Stelle der Ptolemäischen Sonne gesetzt werden. Wir haben also hier als Zentrum die Erde, dann in konzentrischen Kreisen Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn. Außerhalb des Saturn liegt die Sphäre der Fixsterne.

Diese Ordnung der Planeten kann zwar nur als der Ausdruck einer Meinung, nicht eines Beweises betrachtet werden; doch nahmen die alten Astronomen ganz richtig an, daß diejenigen die entfernteren seien, die sich langsamer bewegten. Daß der Mond der nächste, Mars, Jupiter und Saturn die entferntesten Planeten seien, folgte aus dieser Annahme ganz sicher; zweifelhaft aber waren die relativen Stellungen von Sonne, Merkur und Venus, da diese drei einen vollständigen Umlauf an der Himmelskugel in einem Jahre machten. Und so meinte in der Tat Plato, abweichend von Ptolemäus, die Bahnen von Merkur und Venus lägen außerhalb der Sonnenbahn, indem er die Reihenfolge annahm: Mond, Sonne, Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn.

Hipparch und Ptolemäus stellten über die Umlaufszeiten der Planeten und die Ungleichheiten ihrer Bewegung Untersuchungen an, die eine kurze Erwähnung verdienen. Ohne Zweifel war Hipparch als forschender, selbständiger Astronom weit bedeutender als Ptolemäus; aber da er auch einer der ersten war, die alle himmlischen Erscheinungen und Bewegungen sorgfältig beobachteten und untersuchten, so konnte er über keine zur genauen Bestimmung der Umlaufszeiten ausreichenden Beobachtungsreihen verfügen. Ptolemäus dagegen hatte den Vorteil, seine eigenen Beobachtungen mit den drei Jahrhunderte älteren des Hipparch kombinieren zu können.

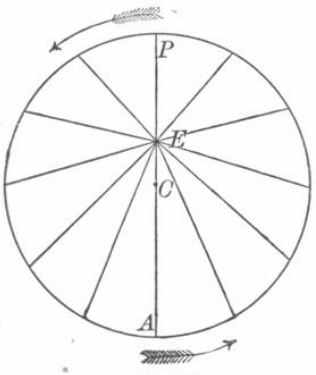


Fig. 13.

Obschon ihre Beobachtungsmittel sehr unvollkommen waren, so fanden diese Beobachter doch, daß die Bewegungen der Planeten unter den Sternen keineswegs gleichförmig waren, und zwar galt dies nicht nur für Sonne und Mond, sondern auch für die oben erwähnten fingierten Planeten. Sie führten daher den *exzentrischen Kreis* ein, indem sie die Bewegungen zwar als kreisförmig und gleichmäßig ansahen, aber Kreise annahmen, deren Mittelpunkte (C, Fig. 13) nicht mit der Erde (E) zusammenfielen. Passiert der Planet den der Erde nächsten Punkt (P) seiner Kreisbahn, so erscheint seine Bewegung schneller als die mittlere, weil allgemein die Winkelgeschwindigkeit eines sich gleichmäßig bewegenden Körpers um so größer ist, je näher sich der Körper

dem Beobachter befindet; umgekehrt ist in A die Winkelgeschwindigkeit eine geringere, die Bewegung erscheint langsamer als im Mittel. Zwischen diesen beiden diametral entgegengesetzten Punkten P und A ändert sich die Geschwindigkeit kontinuierlich vom Maximum zum Minimum und umgekehrt, und es wird daher die Art der Planetenbewegung durch den exzentrischen Kreis im allgemeinen richtig dargestellt. Durch Vergleichung der Winkelgeschwindigkeiten für verschiedene Punkte der Bahn waren Hipparch und vollständiger noch Ptolemäus in den Stand gesetzt, für jede Planetenbahn die angenommene Entfernung der Erde vom Zentrum oder vielmehr das Verhältnis dieser Entfernung zur Entfernung des Planeten selbst zu bestimmen; die so bestimmte Entfernung ist die doppelte wie in Wirklichkeit. Der Punkt P wurde das *Perigäum*, A das *Apogäum*, der Abstand EC der Erde vom Bewegungsmittelpunkte die *Exzentrizität* genannt. Da die absoluten Bahndimensionen nicht zu bestimmen waren, mußten die Alten, wie gesagt, das Verhältnis CE zum Halbmesser des Bahnkreises (CP oder CA) nehmen.

In der Bestimmung der Mondbewegung hingen Hipparch wie Ptolemäus fast durchaus von Beobachtungen der Mondfinsternisse ab. Die erste von ihnen verwertete Mondfinsternis soll zu Babylon im ersten Jahre des babylonischen Herrschers Mardocempad*), zwischen dem 29. und 30. Tage des ägyptischen Monats Thoth, beobachtet worden sein. Sie begann etwa eine Stunde nach Mondaufgang und war total. Nach unserer Zeitrechnung fiel sie auf den 19. März 721 v. Chr.**). Von diesem Datum an bis zur Zeit des Ptolemäus erstreckt sich die Finsternisreihe über 8 bis 9 Jahrhunderte. Wären die uns überlieferten Beobachtungen dieser Finsternisse etwas genauer, so würden sie auch heute noch zur Bestimmung der mittleren Mondbewegung von großem Werte sein; so aber können wir aus unseren jetzigen Sonnen- und Mondtafeln die Umstände einer alten Finsternis fast ebenso genau berechnen, als sie die Astronomen der damaligen Zeit zu beobachten vermochten.

Trotz des äußerst unvollkommenen Charakters der ihnen bekannten Beobachtungen entdeckten doch sowohl Hipparch wie Ptolemäus verschiedene Eigentümlichkeiten der Mondbewegung, die von einer überraschenden Tiefe der Untersuchung zeugen. Durch Vergleichung der Zeit-

*) Babylonisch Mardukpaliddin.

**) Es ist die chronologische Zeitrechnung gemeint, die sich von der astronomischen dadurch unterscheidet, dass bei ihr das Jahr Null der christlichen Ära fehlt, so dass auf das Jahr -1 sofort das Jahr $+1$ folgt. Für die Zeit vor Christi Geburt sind daher die Jahreszahlen nach der astronomischen Zählweise um 1 kleiner als nach der chronologischen.

intervalle zwischen den Finsternissen fanden sie zunächst, daß der Mond sich nicht gleichförmig, sondern wie die Sonne an einigen Stellen der Bahn langsamer bewegt, als an anderen. Um dies zu erklären, nahmen sie seine Bahn, wie die der Sonne, exzentrisch an, und zwar sollte die Erde etwa ein Zehntel der ganzen Mondentfernung von dem Mittelpunkte der kreisförmigen Mondbahn abstehen. Soweit glich die Mondbahn, abgesehen von der großen Exzentrizität, den Bahnen der Sonne und der fingierten Planeten. Eine lange Reihe von Beobachtungen zeigte aber, daß Perigäum und Apogäum nicht, wie bei Sonne und Planeten, an denselben Punkten der Bahn blieben, sondern sich vorwärts bewegten und in 9 Jahren den ganzen Himmel durchliefen. Stellt Fig. 13 die Mondbahn dar, so würde also der Mittelpunkt C des Kreises die Erde E in 9 Jahren umkreisen und die Bahn demgemäß fortwährend ihre Lage gegen eine gegebene Richtung ändern.

Ptolemäus fand ferner durch Messung des Winkels zwischen Mond und Sonne an verschiedenen Punkten der Mondbahn, daß noch eine andere Ungleichheit in seiner Bewegung existiert. Der Mond oszilliert nämlich mehr als einen Grad um die aus dem exzentrischen Kreise berechnete Stellung, in einer Periode, die nicht sehr von seiner Umlaufszeit um die Erde abweicht. Diese Ungleichheit hat den Namen *Evektion* erhalten. Um diese Bewegung darzustellen, mußte Ptolemäus, wie bei den Planeten, einen Epizykel einführen; nur war der Radius hier so klein, daß die Bahn keine Schleifenbildung zeigt. Man sieht, seine Theorie war recht verwickelt; aber es gelang ihm, die Mondbewegung innerhalb der Grenzen seiner Beobachtungsfehler durch eine Kombination von Kreisbewegungen darzustellen und so die Lieblingsansicht jener Zeiten zu retten, daß alle kosmischen Bewegungen kreisförmig und gleichmäßig seien.

8. Der Kalender.

Einer der ersten mit den Untersuchungen über die Bewegungen der Himmelskörper verbundenen Zwecke war, ein bequemes und sicheres Maß der Zeit zu finden. Diese bis in das entlegenste Altertum zurückreichende Anwendung wird, da sie ohne fundamentale Änderung auf uns gekommen ist und von den oben betrachteten scheinbaren Bewegungen von Sonne und Mond abhängt, am natürlichsten in Verbindung mit der alten Astronomie besprochen.

Die astronomischen Einteilungen der Zeit werden durch Tag, Monat und Jahr gegeben. Die Woche ist keine derartige Einteilung, da sie keinem astronomischen Zyklus entspricht, obschon auch ihr eine gewisse

astronomische Bedeutung seitens der alten Astrologen gegeben worden sein soll. Von den obengenannten Zeitabschnitten ist im bewohnbaren Teile der Erde der Tag der auffallendste und ausgeprägteste. In der Nähe der Pole würde das Jahr das auffallendste Zeitmaß abgeben; überall aber, wo zivilisierte Menschen leben, ist Wechsel von Tag und Nacht, und dieser tritt so regelmäßig und gleichförmig auf, daß dadurch überall und zu allen Zeiten die unzweideutigste Einheit des Zeitmaßes gegeben war. Für rein chronologische Zwecke hätte der Tag als einzige theoretisch notwendige Zeiteinheit dienen können; und wenn man zu irgendeiner Zeit begonnen hätte, die Tage, von 1 anfangend, ohne Aufhören zu zählen und jedes geschichtliche Ereignis durch die entsprechende Tageszahl zu bezeichnen, so würde in der Tat weit weniger Unsicherheit über manche Daten herrschen, als es jetzt der Fall ist. Aber die Rechnung mit so großen, im Laufe der Jahrhunderte sich anhäufenden Zahlen wäre sehr unbequem gewesen, und sie ist deshalb auch nie im bürgerlichen Leben angewandt worden; man rechnet nach Tagen selten länger als einen Monat hindurch.

Nächst dem Tag ist das Jahr der bestimmteste und auffallendste Zeitabschnitt. Das natürliche Jahr wird durch die Wiederkehr der Jahreszeiten gemessen. Alle Verrichtungen des Ackerbaues sind so eng mit ihnen verknüpft, daß der Mensch sie als einfachstes Maß der Zeit benutzt haben muß, lange bevor er ihre astronomischen Ursachen erkannt hatte. Bei seiner längeren Dauer entsprach das Jahr am besten dem Zwecke, lange Zeitintervalle zu messen. Die Zahl der Tage in einem Jahr ist indessen immer noch zu groß, als daß man direkt damit rechnen könnte, und es wurde daher ein zwischenliegendes Maß erforderlich. Ein solches war durch die Bewegung und die Phasen des Mondes gegeben. Durch den Neumond, der in ca. 30tägigen Intervallen aus den Strahlen der Sonne herausrückte, fand sich für Zeiträume von mittlerer Länge ein sehr passendes Zeitmaß, und dauerndes Interesse verband sich mit diesem Maße durch die zahlreichen religiösen Riten, die an das regelmäßige Wiedererscheinen des Mondes geknüpft wurden.

Die Woche ist ein vom Monat und Jahr durchaus unabhängiger Zeitabschnitt, und ihre Anwendung, die sich bei den verschiedensten Völkern findet, reicht in sehr frühe Zeiten zurück. Die alten Astrologen verteilten Sonne, Mond und Planeten unter die sieben Wochentage nach der in Fig. 14 ersichtlich gemachten Art. Die Gestirne, nach der Entfernung im Ptolemäischen System geordnet, folgen aufeinander im Kreise und umgekehrt wie der Uhrzeiger gehend, die Wochentage nach den geraden Verbindungslinien.

Enthielte der Mondmonat genau eine bestimmte Zahl, z. B. 30 Tage, und das Jahr gerade 12 Monate, so würde die Anwendung dieser Zyklen für die Zeitmessung keine Schwierigkeiten geboten haben. Aber der Monat hat einige Stunden weniger als 30 Tage, das Jahr dagegen nahe $12^1/_2$ Mondmonate. Bei dem Versuche, diese Maße zu kombinieren, wurde in dem alten Kalender eine Verwirrung hervorgerufen, welche seinen Gebrauch sehr erschwerte, und deren Nachwirkung wir noch heute in der ungleichen Länge unserer Monate empfinden. Alle Mittel zu beschreiben, die zur Beseitigung dieser Schwierigkeiten in Anwendung gekommen

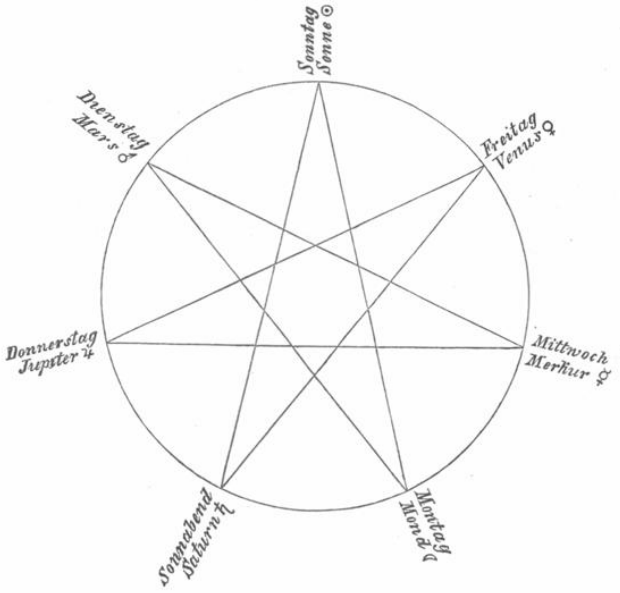


Fig. 14. Astrologisches Schema für Wochentage und Planeten.

sind, würde sehr umständlich sein, und wir müssen uns deshalb hier auf eine kurze Darlegung des Wesens der Kalenderverbesserungen beschränken.

Der Mondmonat oder das mittlere Intervall zwischen zwei einander folgenden Neumonden ist sehr nahe $29^1/_2$ Tage. Bei Zählung der Monate nach dem Mondwechsel wurde daher gewöhnlich ihre Dauer abwechselnd zu 29 und zu 30 Tagen angenommen. Aber die Periode von $29^1/_2$ Tagen ist in Wirklichkeit etwa $^3/_4$ Stunde zu kurz. Im Laufe von drei Jahren würde daher die Rechnung um einen Tag falsch werden, und es würde nötig sein, einen Tag zu einem der Monate hinzuzufügen. Wenn nach Mondmonaten gezählt wird, würde andererseits das aus 12 solcher Monate

bestehende Jahr 354 Tage enthalten, also 11 Tage zu kurz sein. Gleichwohl ist ein solches (Mond)-Jahr sowohl bei den Griechen als bei den Römern in Gebrauch gewesen und noch heute in Gebrauch bei den Mohammedanern. Indessen addierten die alten Römer, um den Fehler auszugleichen, nach dem Kalender des Numa in jedem zweiten Jahre abwechselnd 22 oder 23 Tage, indem sie einen Schaltmonat, den sogen. Mercedonius, zwischen dem 23. und 24. Februar einfügten.

Die Unregelmäßigkeit und Unbequemlichkeit der Rechnung nach den Mondmonaten führte bei den meisten zivilisierten Völkern des Altertums bald zu ihrer Abschaffung, da der einzige Grund, sie beizubehalten, in den zur Zeit des Neumondes gebräuchlichen religiösen Riten lag, auf welche allerdings die Juden und einige andere orientalische Völker großes Gewicht legten. So finden wir bei den alten Ägyptern die Zählung des Jahres zu 12 Monaten, mit je 30 Tagen, und 5 Zusatztagen, zusammen also 365 Tage. Da die wahre Jahreslänge etwa 6 Stunden größer ist, so würde die Nachtgleiche jedes Jahr 6 Stunden und nach 120 Jahren einen Monat (30 Tage) später eintreten. Nach Verlauf von 1460 Jahren würde nach dieser Zählweise jede Jahreszeit nacheinander in die 12 Monate gefallen und zu demselben Datum wie zu Anfang der Periode zurückgekehrt sein. Diese Periode nannten die Ägypter die *Sothisperiode*, nach dem Sirius (Sopt, Soth), dessen heliakischen Aufgang*) sie eifrig beobachteten. Da jedoch der Fehler jedes einzelnen Jahres von ihnen überschätzt wurde, so würde die wahre Dauer der Periode etwa 1500 Jahre gewesen sein.

Die Verwirrung im Jahre der Griechen wurde zum Teil gehoben durch Einführung des Zyklus, den Meton (im 5. Jahrhundert v. Chr.) entdeckte, und der seinen Namen trägt. Dieser Zyklus besteht aus 19 Jahren, in welchen der Mond 235 mal wechselt. Sein Fehler ist sehr klein, wie aus den folgenden Zahlen, die auf modernen Daten beruhen, hervorgeht:

235 Lunationen sind im Durchschnitt	6939^{d}	16^{h}	31^{m}
19 wahre tropische Sonnenjahre	6939	14	27
19 julianische Jahre zu $365^{1}/_{4}$ Tagen	6939	18	0.

Nehmen wir daher 235 Mondmonate und verteilen sie gleichförmig auf 19 Jahre, so wird die Durchschnittslänge dieser Jahre für alle bürgerlichen Zwecke genügend richtig sein. Die Jahre eines jeden Zyklus wurden von 1 bis 19 gezählt; die Nummer des Jahres nannte man die *goldene Zahl.*

*) Der *heliakische Aufgang* eines Sternes bezeichnete bei den Alten sein erstes Wiedererscheinen am Morgenhimmel nach Austritt aus den Sonnenstrahlen.

Die goldene Zahl ist in unseren Kirchenkalendern zur Auffindung des Datums vom Ostersonntag noch heute in Gebrauch; und es ist Ostern nebst den damit in Verbindung stehenden Festen das einzige kirchliche Fest, welches in christlichen Ländern von der Mondbewegung abhängt. Ostern fällt auf den ersten Sonntag nach dem Frühlingsnachtgleichen-Vollmond, d. h. demjenigen, der zunächst nach dem 21. März eintritt. Die Daten des Vollmondes entsprechen dem Metonischen Zyklus, sie kehren also nach Verlauf von 19 Jahren an denselben oder doch nahe denselben Tagen wieder. Notieren wir folglich die Daten des Ostervollmondes, so werden wir in 19 aufeinanderfolgenden Jahren nie denselben Tag finden; im 20. Jahre dagegen wird er auf dasselbe Datum wie im ersten Jahre fallen oder nur um einen Tag abweichen, und dann wird die ganze Reihenfolge wiederholt werden. Die goldene Zahl für ein bestimmtes Jahr zeigt demnach, mit einer für kirchliche Zwecke ausreichenden Genauigkeit, wie viele Tage nach dem Frühlingsäquinoktium der Ostervollmond eintritt. Für die Bestimmung des Ostersonntages selbst sind noch andere Daten erforderlich: der sogenannte Sonntagsbuchstabe (der auf den ersten Sonntag des Jahres fallende Buchstabe, wenn man den 1. Januar mit A, den 2. mit B usw. bezeichnet), und die Epakten, die das Alter des Mondes in Tagen am 1. Januar angeben. Eine sehr einfache und bequeme Regel zur Berechnung des Osterfestes für alle Jahre hat Gauß gegeben. Bezeichnet man die Jahreszahl mit N und die Divisionsreste von $\frac{N}{19}$ mit a, $\frac{N}{4}$ mit b, $\frac{N}{7}$ mit c, $\frac{19a+x}{30}$ mit d und $\frac{2b+4c+6d+y}{7}$ mit e, so findet sich als Ostertag:

der $(22+d+e)$ te März, bzw. der $(d+e-9)$ te April,

wenn man für x und y die folgenden Zahlenwerte einsetzt (für den Gregorianischen Kalender):

1583	bis	1699	$x = 22$,	$y = 2$
1700	»	1799	23	3
1800	»	1899	23	4
1900	»	2099	24	5,

und wenn man beachtet, daß an Stelle des 26. April stets der 19. April, an Stelle des 25. April aber nur dann der 18. April zu setzen ist, wenn $d = 28$ und $a > 10$ gefunden worden ist*).

*) Die Ostersonntage für die nächsten Jahre sind:

1914 April 12	1918 März 31	1922 April 16
1915 April 4	1919 April 20	1923 April 1
1916 April 23	1920 April 4	1924 April 20
1917 April 8	1921 März 27	1925 April 12

Die kirchlichen Berechnungen des Ostersonntages beruhen auf sehr alten Mondtafeln, so daß wir bei Bestimmung nach dem wirklichen Monde das Osterfest oft eine Woche irrtümlich finden würden.

Der Grund zu der jetzt in der Christenheit gebräuchlichen Kalenderrechnung wurde durch Julius Cäsar gelegt. Vor seiner Zeit war der römische Kalender in einem Zustande großer Unordnung, da die nominelle Länge des Jahres in hohem Grade von Laune und willkürlicher Bestimmung des Pontifex Maximus abhing. Es war indessen wohl bekannt, daß die wahre Dauer des Sonnenjahres etwa $365^1/_4$ Tage betrage, und Julius Cäsar stellte nun gesetzlich fest, daß das gewöhnliche Jahr aus 365 Tagen bestehen sollte, und daß jedes vierte Jahr ein Tag hinzuzufügen sei. Die Monatslängen, wie wir sie jetzt haben, wurden durch Cäsars unmittelbare Nachfolger festgesetzt.

Der Julianische Kalender blieb durch 16 Jahrhunderte ungeändert, und wäre die wahre Länge des tropischen Jahres genau $365^1/_4$ Tage, so würde er auch heute noch in Gebrauch sein. Wir haben aber gesehen (S. 17), daß das Sonnenjahr in der Tat etwa $11^1/_4$ Minuten kürzer ist, ein Betrag, der in 128 Jahren einen vollen Tag ergibt. Es trafen daher im 16. Jahrhunderte die Äquinoktien 11 oder 12 Tage früher ein, als sie es nach dem Kalender tun sollten, also am 10. oder 9. anstatt am 21. März. Sie auf die ursprüngliche Lage im Jahre oder genauer auf die zur Zeit des Konzils von Nicäa zu bringen, war der Gegenstand der Gregorianischen Kalenderreform, die Papst Gregor XIII. Ende des 16. Jahrhunderts nach den Vorschlägen des Italieners Lilio anordnete. Die Änderung bezog sich auf zwei Punkte:

1. wurde der 5. Oktober 1582 des Julianischen Kalenders der 15. genannt; es wurden also 10 Tage in der Zeitrechnung übersprungen, so daß die Äquinoktien jetzt wieder richtig auf den 21. März und 23. September fielen;

2. sollte das Endjahr jedes Jahrhunderts, 1600, 1700 usw., nicht wie im Julianischen Kalender stets, sondern nur dann ein Schaltjahr sein, wenn die Zahl des Jahrhunderts (16, 17, 18 usw.) durch 4 teilbar ist. Während also 1600, 2000, 2400 usw. wie früher Schaltjahre mit 366 Tagen blieben, sollten 1700, 1800, 1900, 2100 usw. gewöhnliche Jahre zu 365 Tagen sein.

Diese Änderung im Kalender wurde in den katholischen Ländern sehr bald, in den protestantischen dagegen langsamer adoptiert (in England z. B. erst 1752). In den Ländern der griechischen Kirche, hauptsächlich also in Rußland, besteht noch heute der Julianische Kalender. Ihre Rechnung ist demzufolge, da die Jahre 1700, 1800 und 1900 im

neuen Kalender keine Schaltjahre waren, jetzt 13 Tage hinter der unsrigen zurückgeblieben.

Die Länge des mittleren Gregorianischen Jahres ist $365^d\ 5^h\ 49^m\ 12^s$, die des tropischen $365^d\ 5^h\ 48^m\ 46^s$. Ersteres ist also noch 26^s zu lang, ein Fehler, der indessen erst in mehr als 3000 Jahren einen Tag ausmacht und daher praktisch von gar keiner Bedeutung ist.

KAPITEL II.

Das Kopernikanische System oder die wahren Bewegungen der Himmelskörper.

1. Kopernikus.

In dem ersten Abschnitte des vorhergehenden Kapitels beschrieben wir die scheinbare tägliche Bewegung der Gestirne, wonach alle Himmelskörper im Laufe eines Tages in Kreisen um die Sphäre geführt zu werden scheinen. Jeder Beobachter dieser Bewegung, der die Erde als eine Ebene und die Richtung nach unten überall als die gleiche voraussetzt, würde sie naturgemäß für die wirkliche halten; aber bereits sehr geringe geometrische Kenntnisse würden ihm zeigen, daß die Erscheinungen ebensowohl durch eine Umdrehung der Erde erklärt werden können. Der scheinbar verhängnisvolle Einwurf gegen diese Ansicht würde der sein, daß dann die Oberfläche der Erde nicht wagerecht bleiben könnte und alles aus seiner Lage weggleiten müßte. Es war nun aber für die Seefahrer unmöglich, die Rundung der Oberfläche des Meeres zu übersehen, und in der Tat kannte Ptolemäus nicht nur die wahre Figur der Erde, sondern wußte auch, daß sie im Vergleich mit den Himmelsräumen an Größe nur ein Punkt sei. Er besaß demnach alle notwendigen Kenntnisse, um einsehen zu können, daß der sich bewegende Körper viel eher die kleine Erde als die unermeßliche Himmelssphäre sein müßte. Trotzdem verwarf er, in Aristotelischer Naturanschauung befangen und auf Grund verworrener physikalischer Ansichten, deren Unhaltbarkeit ihm wenige einfache Experimente gezeigt haben würden, diese Theorie. Und obschon man weiß, daß die Rotation der Erde gelegentlich von seinen Zeitgenossen und sogar von seinen Vorgängern gelehrt wurde, so war doch seine Autorität so groß, daß sie nicht nur alle Argumente der Gegner überwand, sondern auch seine Ansichten durch vierzehn Jahrhunderte menschlicher Geistesgeschichte tragen konnte.

Dem Leser bietet die Geschichte der Astronomie während dieser Zeit kaum ein Interesse. Es gab kein Fernrohr, die Himmel zu erforschen, und kein Genius erstand, der der Weltanschauung den toten Mechanismus, nach dem sie konstruiert war, geraubt hätte. Eine gewisse systematische Kenntnis, Bewahrung und Förderung wissenschaftlicher und nicht nur astronomischer Wahrheiten verdankt die Nachwelt in dieser Zeit hauptsächlich den Arabern. Männer wie Albategnius, Abul Wefa u. a. verbesserten alte und erfanden neue Methoden zur Beobachtung der Örter der Himmelskörper und waren dadurch fähig, verbesserte Tafeln der Bewegungen derselben aufzustellen. Sie maßen die Schiefe der Ekliptik und berechneten Sonnen- und Mondfinsternisse mit größerer Schärfe, als es die Griechen vermochten. So wurden zwar die Voraussagungen der Wissenschaft allmählich genauer, aber kein entschiedener Schritt erfolgte in der Erkenntnis der wahren Gesetze der scheinbaren Bewegungen.

Der Ruhm, die wahre Natur der kosmischen Bewegungen der Welt zuerst verkündet zu haben, gebührt fast ausschließlich dem Kopernikus. Zwar sind schon vor ihm gelegentlich Ansichten ausgesprochen worden, die an die seinigen anklingen (namentlich von Aristarch von Samos), aber diese Vorstellungen weichen doch meist in nicht unwesentlichen Punkten von der Lehre des Frauenburger Kanonikus ab und sind nie zu einem vollständigen, in sich abgeschlossenen System entwickelt worden, dessen innere Folgerichtigkeit weitere Kreise von seiner Wahrheit hätte überzeugen können.

Ein großes Verdienst des Kopernikus und die Grundlage seines gerechten Anspruchs auf die Priorität besteht einerseits darin, daß er keineswegs durch die bloße Behauptung und Aufstellung seiner Ansichten befriedigt war, sondern den größten Teil der Arbeit eines ganzen Lebens ihrer Begründung weihte, so daß ihre schließliche Annahme unvermeidlich wurde. Andererseits aber müssen wir in ihm den Mann verehren, dessen Geist sich zuerst von den in Fleisch und Blut der damaligen Gelehrten übergegangenen Aristotelischen Ansichten freizumachen verstanden hat. Nach Aristoteles war die Erde das Sinnbild des Festen und Unveränderlichen im Gegensatze zu Feuer und Wasser, und hiernach war es ein Unding, der Erde eine Bewegung zuzuschreiben. Die Überwindung dieses Vorurteils ist ein geistiger Schritt von derselben Bedeutung, wie jede andere neue Naturerkenntnis, die eine bis dahin unüberwindliche Kluft überbrückt; und das Verdienst des Kopernikus beruht weniger in der Aufstellung seiner Theorie, als in der dieser zugrunde liegenden Weltanschauung. Einen strengen Beweis für die Richtigkeit seiner Theorie hat Kopernikus nicht gegeben und auch nicht zu geben vermocht. Er wollte und konnte nur zeigen, daß seine Annahme die Bewegungserscheinungen am Himmel

und namentlich die Bewegungen der Planeten weit einfacher und natürlicher erkläre als das Ptolemäische System, und daß sie darum weit wahrscheinlicher sei als dieses. Aber auch abgesehen von allen Fragen über Wahrheit oder Irrtum seiner Theorie würde sein großes Werk, in dem sie entwickelt ist, »De Revolutionibus Orbium Cœlestium Libri VI, Norimbergae 1543«, als das wichtigste Lehrbuch der Astronomie seit der Zeit des Ptolemäus gelten müssen. Nur wenige Bücher sind wie dieses die Arbeit eines ganzen Lebens gewesen.

Die fundamentalen Prinzipien des Kopernikanischen Systems liegen in zwei bestimmten Sätzen, die besonders ausgeführt und begründet werden mußten, und von denen der eine unabhängig vom anderen wahr sein konnte. Es sind diese:

1. Die tägliche Umdrehung des Himmels ist nur scheinbar und ist hervorgerufen durch eine tägliche Umdrehung der Erde um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Achse.

2. Die Erde ist einer der Planeten und kreist um die Sonne als den Mittelpunkt der Bewegung. Das wahre Zentrum der planetarischen Bewegungen ist also nicht die Erde, sondern die Sonne.

Aus diesem Grunde wird von dem Kopernikanischen System häufig auch als von der »heliozentrischen Theorie« gesprochen, während man die ältere Theorie, welche die Erde in den Mittelpunkt der Welt setzt, die »geozentrische« nennt.

Kopernikus beginnt mit der Besprechung des ersten Satzes. Er erklärt, wie eine scheinbare Bewegung ebensowohl aus einer wirklichen Bewegung des Beobachters folgen kann, wie aus einer Bewegung des beobachteten Objekts, und zeigt so, daß die tägliche Bewegung der Gestirne gerade so gut durch die Umdrehung der Erde wie durch die des Himmels erklärt werden kann, ähnlich wie dem Schiffer, der auf ruhiger See segelt, sein Schiff in Ruhe und das Ufer in Bewegung zu sein scheint, während doch das Umgekehrte stattfindet. Was ist nun wahrscheinlicher, daß sich die Erde bewegt oder das ganze Universum außer ihr? In dem Verhältnis, in welchem der Himmel größer ist als die Erde, muß auch seine Bewegung schneller sein, um ihn in 24 Stunden einmal rundum führen zu können. Es ist demnach schon aus diesem Grunde außerordentlich viel wahrscheinlicher, daß sich die Erde, ein Punkt im Vergleiche zur Himmelskugel, dreht und das Universum unbeweglich ist, als umgekehrt.

Der zweite Hauptsatz des Kopernikanischen Systems, daß die scheinbare jährliche Bewegung der Sonne unter den Sternen nur die Folge einer jährlichen Umdrehung der Erde um die Sonne ist, beruht auf einem schönen Ergebnis der Gesetze der relativen Bewegung. Diese Be-

wegung der Erde erklärt dann nicht allein jenen scheinbaren Umlauf der Sonne, sondern auch die scheinbare epizyklische Bewegung der Planeten des Ptolemäischen Systems.

In Fig. 15 sei S die Sonne, $A\,B\,C\,D$ die Bahn der Erde und die Zahlen 1, 2 . . . 6 bezeichnen sechs (etwa je 14 Tage voneinander abstehende) Stellungen der Erde; endlich möge $E\,F\,G\,H$ die scheinbare Himmelssphäre (genauer die Ekliptik oder die Projektion der Erdbahn auf die Sphäre) bedeuten. Ein Beobachter in 1 sieht nun die Sonne in

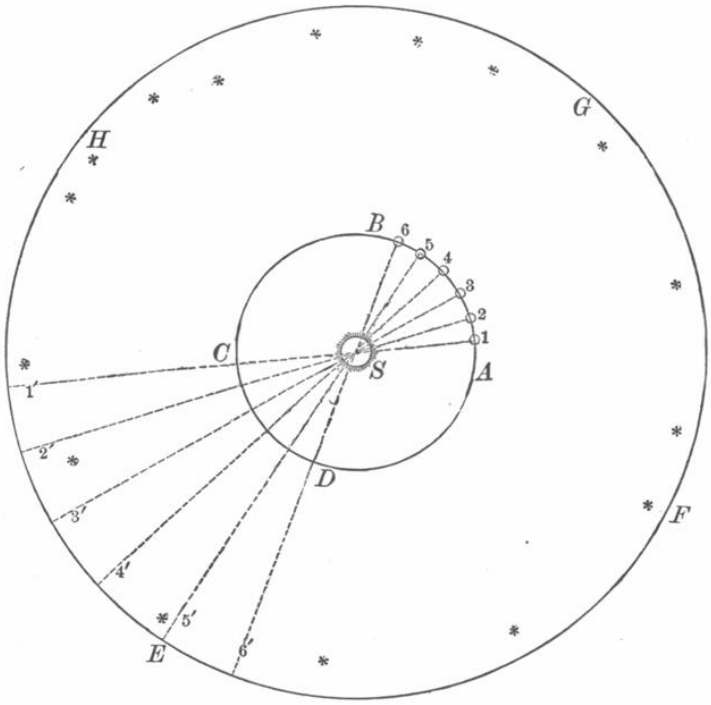


Fig. 15. Wirkliche Bewegung der Erde und scheinbare Bewegung der Sonne.

der Richtung $1\,S$ und versetzt sie, da er keine Vorstellung von ihrer wirklichen Entfernung hat, an die Fixsternsphäre in den Punkt 1′. Erreicht die Erde den Punkt 2, so sieht der Beobachter die Sonne in der Richtung $2\,S\,2'$ oder unter den Sternen im Punkte 2′. Im Verlauf von 14 Tagen wird sich also die Sonne scheinbar unter den Sternen bewegt haben und zwar um einen Winkel, der gleich der wirklichen Winkelbewegung der Erde um die Sonne ist. Ebenso wird weiter für die Stellungen der Erde in 3, 4, 5, 6 die Sonne in den Stellungen 3′, 4′, 5′, 6′ erscheinen und, hat die Erde ihre ganze Bahn $A\,B\,C\,D\,A$ zurückgelegt,

auch die Sonne entsprechend den ganzen Kreis $EFGHE$ durchlaufen haben. So ergibt sich demnach aus der jährlichen Bewegung der Erde um die Sonne die früher beschriebene scheinbare jährliche Bewegung der Sonne in der Ekliptik um die Himmelskugel.

Wir wollen nun sehen, wie dieselbe Bewegung das verwickelte System der Epizykel beseitigt, durch welche die Astronomen vor Kopernikus die Planetenbewegungen darstellten. Der Grundsatz, auf welchem diese Erklärung beruht, ist dieser: Betrachtet ein unbewußt bewegter Beobachter ein ruhendes Objekt, so wird ihm dasselbe bewegt erscheinen in einer seiner eigenen entgegengesetzten Richtung und mit einer gleichen Winkelgeschwindigkeit. Ein bekanntes Beispiel hierzu ist die scheinbare Bewegung von Gegenständen am Ufer für die Passagiere eines Dampfschiffes.

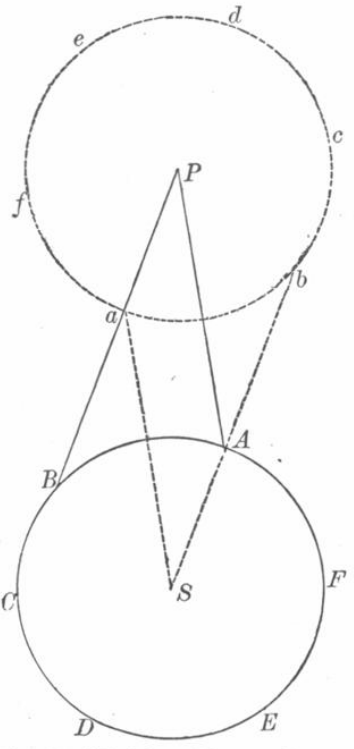


Fig. 16. Scheinbare Planetenbewegung im Kopernikanischen System.

In Fig. 16 werde ein Beobachter auf der Erde im Kreise $ABCDEF$ um die Sonne getragen, er denke sich aber ruhend in dem Mittelpunkte der Bewegung S. Wir wollen nun untersuchen, wie sich ihm die scheinbare Bewegung des zunächst als ruhend gedachten Planeten P darstellt. Es sei zuerst der Beobachter in A, so sieht er den Planeten wirklich in der Richtung und Entfernung AP. Da er aber, der Voraussetzung nach, im Mittelpunkte S zu sein glaubt, so versetzt er den Planeten, in gleicher Richtung und Entfernung, nach a. Während er unbewußt von A nach B fortrückt, scheint ihm der Planet, da er immer in S zu sein glaubt, rückwärts von a nach b zu gehen, er versetzt ihn nach b, so daß Sb gleich und parallel BP ist. Entfernt er sich dann durch den Bogen BCD vom Planeten, so scheint dieser in umgekehrter Richtung, also durch bcd, sich zu entfernen. Bewegt er sich weiter von links nach rechts durch DE, so scheint der Planet sich von rechts nach links durch de zu bewegen. Nähert er sich endlich dem Planeten durch EFA, so scheint auch dieser ihm näher zu kommen durch efa, bis er schließlich in A wieder wie zu Anfang den Planeten nach a versetzen wird. So scheint also der wirklich in Ruhe befindliche Planet P

dem scheinbar (in S) ruhenden Beobachter den Kreis $abcdefa$ zu durchlaufen, der das Spiegelbild des vom Beobachter wirklich beschriebenen Kreises $ABCDEFA$ ist. Gibt es statt eines Planeten mehrere, so werden sie alle entsprechende Kreise zu beschreiben scheinen.

Ist nun der Planet P gleichfalls in Bewegung, so wird seine scheinbare Kreisbewegung sich mit der wirklichen Vorwärtsbewegung verbinden und er dann einen Kreis um ein sich bewegendes Zentrum beschreiben. So haben wir also die scheinbare Bewegung der Planeten um einen bewegten Mittelpunkt, wie sie bei Betrachtung des Ptolemäischen Systems geschildert ist. Wir sahen dort, daß in diesem System die Planetenbewegungen dargestellt werden, indem man einen fingierten Planeten annimmt, der am Himmel in regelmäßiger Bewegung fortschreitet, während der wirkliche Planet um diesen fingierten als Mittelpunkt einmal im Jahre kreist. Es ist nun diese progressive Bewegung des fingierten Planeten im Falle von Mars, Jupiter und Saturn in der Tat die Bewegung des wirklichen Planeten um die Sonne, während der Kreis, den der wirkliche Planet um den fingierten beschreibt, nur eine Scheinbewegung und das Spiegelbild der Bewegung der Erde um die Sonne ist. Vergleicht man die epizyklische Bewegung in den Figuren 10 und 11 mit der in Figur 16 veranschaulichten Bewegung, so findet man, daß sie in jeder Einzelheit übereinstimmen, wenn man sich die Bewegung von P in Fig. 16 an die Sphäre projiziert denkt. Bei den inneren Planeten Merkur und Venus ist die epizyklische Bewegung, der zufolge sie um die Sonne hin und her zu oszillieren scheinen, bedingt durch ihre Bahnbewegung um die Sonne, während die fortschreitende Bewegung, mit der sie der Sonne folgen, aus der Bewegung der Erde um die Sonne resultiert.

Wir sehen nun leicht ein, wie die retrograden Bewegungen und die Stillstände der Planeten ihre Erklärung im Kopernikanischen System finden. Die Erde und alle Planeten bewegen sich um die Sonne im gleichen Sinne von Westen nach Osten. Befinden sich die Erde und ein äußerer Planet auf derselben Seite der Sonne, z. B. in E_1 und P_1 (Fig. 17), so bewegen sie sich nach derselben Richtung, nach E_2 und P_2. Da aber die Erde schneller in ihrer Bahn läuft als der Planet, so wird letzterer sich einem Beobachter auf der Erde nach Westen, also rückläufig, zu bewegen scheinen, während seine wirkliche Bewegung nach Osten gerichtet ist; er wird also an der unendlich entfernten Sphäre von P_1' (der Projektion von P_1) scheinbar nach P_2' (der Projektionen von P_2) rücken. Geht die Erde auf die andere Seite der Sonne (nach E_6 und E_7), so wird ihre Bewegungsrichtung der des Planeten entgegengesetzt (P_6 und P_7), und es wird daher die nach Osten gerichtete Bewegung des letzteren um

die ganze Bewegung der Erde vermehrt, d. h. er scheint an der Sphäre den Bogen $P_6' P_7'$ zurückzulegen. Zwischen diese beiden Bewegungsrichtungen fällt eine Stelle, wo sich der Planet gar nicht zu bewegen scheint; diese ist also der Stillstands- oder *stationäre Punkt*. Bei den inneren Planeten Venus und Merkur ist die scheinbare Bewegung eine rückläufige (nach Westen), wenn der Planet sich zwischen uns und der Sonne befindet, da seine Bahngeschwindigkeit größer ist als die der Erde. Im weiteren Laufe erscheint er dann, und zwar westlich von der Sonne, stationär und wird, wenn er auf die andere Seite der Sonne kommt, rechtläufig. Allgemein ist die Bewegung eines Planeten immer direkt nach Osten), wenn die zwischen entsprechenden Punkten seiner Bahn

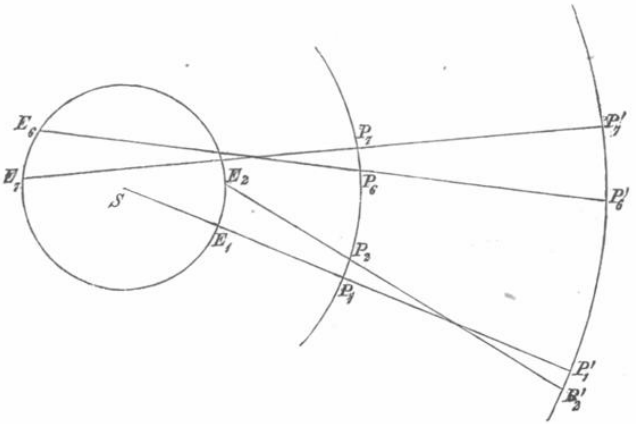


Fig. 17. Direkte und retrograde Bewegungen.

und der Erdbahn gezogenen Linien sich zwischen Planet und Erde schneiden, und rückläufig (nach Westen), wenn sie sich außerhalb der Planetenbahn bei äußeren Planeten, außerhalb der Erdbahn bei inneren Planeten schneiden. Die Bewegung ist Null, oder der Planet ist stationär, wenn die Verbindungslinien einander parallel sind.

Wir wollen jetzt einen Augenblick bei Betrachtungen verweilen, die es ermöglichen, dem Ptolemäischen System Gerechtigkeit widerfahren zu lassen, indem sie zeigen, ein wie notwendiger Schritt in der Entwicklung der wahren Theorie der Bewegungen im Sonnensystem dasselbe war. Der große Wert des Systems bestand in der Zerlegung der scheinbar verwickelten Planetenbewegungen in eine Kombination zweier Kreisbewegungen, der des fingierten Planeten rund um den Himmel, der des wirklichen um den fingierten. Ohne diese Trennung hätten die beständigen Vor- und Rückwärtsschwingungen der Planeten nur die Vorstellung von

einer Bewegung hervorrufen können, die zu verwickelt ist, als daß man sie aus geometrischen Prinzipien erklären könnte. Richtete man aber, ohne Rücksicht auf die regelmäßig fortschreitende Bewegung des fingierten Planeten, die Aufmerksamkeit auf die epizyklische Bewegung allein, so mußte die merkwürdige Analogie zwischen dieser und der scheinbaren jährlichen Bewegung der Sonne hervortreten. Sah man dies ein, so war im geometrischen Sinne nur ein kleiner Schritt zu der Erkenntnis erforderlich, daß die Sonne und nicht die Erde der Mittelpunkt der planetarischen Bewegungen sei. Dann verhinderte also nur die Sinnestäuschung und die oben angedeutete, allerdings sehr große physikalische Schwierigkeit die Annahme, daß die Erde selbst als ein Planet die Sonne umkreise, und daß die jährliche Bewegung der letzteren wie die epizyklische Bewegung der Planeten nicht reelle, sondern scheinbare Bewegungen seien, welche von der Bewegung der Erde selbst herrühren. Die heliozentrische Theorie hätte kaum auf einem anderen Wege als auf diesem entwickelt werden können.

Das Kopernikanische System bietet die Mittel, die Verhältnisse im Sonnensystem oder die relativen Entfernungen der verschiedenen Planeten mit großer Schärfe zu bestimmen, das heißt, anzugeben, wenn wir als Maßstab die Entfernung der Erde von der Sonne nehmen, wieviel Längen dieses Maßes oder welche Bruchteile seiner Länge die Entfernung eines jeden anderen Planeten beträgt, obschon die Länge des Maßes selbst unbekannt bleibt. Diese Bestimmung beruht auf dem Prinzip, daß der scheinbare, vom Planeten beschriebene Kreis oder Epizykel (Fig. 16) ebenso groß ist als der wirkliche, von der Erde um die Sonne beschriebene Kreis. Je näher also der Beobachter diesem Kreise ist, desto größer wird er ihm erscheinen. Der scheinbare Epizykel des äußersten jetzt bekannten Planeten, des Neptun, hat einen Halbmesser von etwas weniger als 2°, d. h. der wahre Neptun weicht infolge der jährlichen Bewegung der Erde um die Sonne etwas weniger als 2° zu beiden Seiten seiner mittleren Stellung aus; umgekehrt folgt daraus, daß die Erdbahn, vom Neptun aus gesehen, einen Winkel von etwas weniger als 4° (genauer 3° 50′) einschließt. Andererseits schwingt Mars im allgemeinen mehr als 40°, mitunter selbst mehr als 45° aus. Eine einfache trigonometrische Rechnung zeigt, daß seine mittlere Entfernung von der Sonne etwa $1^1/_2$mal die der Erde ist, und die Veränderlichkeit der scheinbaren Ausweichung beweist, daß die Entfernung zu verschiedenen Zeiten verschieden ist.

Da es nicht uninteressant ist, zu sehen, wie genau Kopernikus die Planetenentfernungen zu bestimmen vermochte, so stellen wir in der folgenden Tafel die von ihm bestimmten Werte für die Entfernungen der

Planeten von der Sonne mit den wahren Daten zusammen. Als Einheit ist die Entfernung der Erde genommen.

Planeten	Kleinste Entfernung		Größte Entfernung	
	Kopernikus	wirkl.	Kopernikus	wirkl.
Merkur	0.326	0.308	0.405	0.467
Venus	0.709	0.718	0.730	0.728
Mars	1.373	1.382	1.666	1.666
Jupiter	4.980	4.952	5.453	5.454
Saturn	8.66	9.00	9.76	10.07

Erwägt man die Unvollkommenheit der Beobachtungsmittel jener Zeit, so sind die Kopernikanischen Resultate schon sehr genau zu nennen. Die verhältnismäßig größte Abweichung findet sich beim Merkur, der auch jetzt noch unter allen großen Planeten am schwersten zu beobachten ist. Kopernikus soll tatsächlich gestorben sein, ohne ihn je gesehen zu haben.

Die Exzentrizitäten der Bahnen wurden von Kopernikus auf eine Weise ermittelt, die vollständig mit den jetzigen Methoden übereinstimmt, wenn nur eine rohe Annäherung gesucht wird. Wie Ptolemäus verlegte auch er das Zentrum der Kreisbahnen der Planeten nicht in die Sonne, sondern um einen kleinen Betrag, die Exzentrität, daneben. Es war aber lange bekannt, daß die Theorie der gleichförmigen Bewegung in einem exzentrischen Kreise, obschon sie die Unregelmäßigkeiten in der Winkelbewegung des Planeten ganz richtig darstellt, doch die wirklichen Änderungen der Entfernung verdoppelt. Kopernikus nahm daher für die Exzentrizität einen Mittelwert an zwischen jenem, welcher der Bewegung in Länge genügen und dem, welcher die Distanzänderungen geben würde, und fügte dementsprechend einen kleinen Epizykel von einem Drittel dieser Exzentrizität hinzu; so stellte er dann, in der Voraussetzung, der Planet mache zwei Umläufe in diesem Epizykel während eines Umlaufes um die Sonne, beide Unregelmäßigkeiten dar*).

Das Werk des Kopernikus war der größte je in der Astronomie ge-

*) Mathematisch läßt sich die Theorie des Kopernikus so ausdrücken: Wenn e die Exzentrizität, g die mittlere Anomalie des Planeten bezeichnet, so lassen sich die rechtwinkligen Koordinaten in folgender Form geben:

$$x = a(\cos g - e + \tfrac{1}{3} e \cos 2g)$$

$$y = a(\sin g + \tfrac{1}{3} e \sin 2g),$$

während die Näherungsformeln der elliptischen Bewegung sind:

$$x = a(\cos g - \tfrac{3}{2} e + \tfrac{1}{2} e \cos 2g)$$

$$y = a(\sin g + \tfrac{1}{2} e \sin 2g).$$

Beide stimmen überein, wenn wir statt e in den ersten Formeln $\tfrac{3}{2} e$ setzen.

machte Schritt. Aber auch er zeigte nur, welche scheinbaren Bewegungen am Himmel reell sind, und welche aus der Bewegung des Beobachters folgen. In anderer Hinsicht gründete sich nicht nur sein Werk auf Ptolemäus, sondern teilte er auch viele Anschauungen der alten, Aristotelischen Philosophie über die Natur der Dinge und den Bau der Welt. Wie Ptolemäus hielt auch Kopernikus den Himmel für eine Sphäre und alle himmlischen Bewegungen für einfach oder zusammengesetzt kreisförmig. Auf die Einwürfe des Ptolemäus gegen die Theorie der Erdbewegung (S. 31) erwiderte er, daß dieser Forscher sie als eine gewaltsame oder heftige Bewegung betrachte und ganz vergesse, daß sie, wenn vorhanden, eine natürliche Bewegung sein müsse, deren Gesetze von jenen der plötzlichen, heftigen vollständig verschieden seien. So war seine Argumentation zum Teil in der Tat ohne wissenschaftliche Grundlage, obschon seine Schlußfolgerung korrekt war. Indessen tat Kopernikus wohl alles, was unter den gegebenen Umständen getan werden konnte. Seine Hypothese eines kleinen Epizykels von einem Drittel der Exzentrizität stellte die Bewegungen der Planeten um die Sonne mit aller damals erreichbaren Genauigkeit dar, während es, in Ermangelung irgendwelcher Kenntnis der Bewegungsgesetze überhaupt, unmöglich war, eine dynamische Basis für die Theorie der Planetenbewegung zu gewinnen.

2. Schiefe der Ekliptik, Jahreszeiten usw. im Kopernikanischen System.

Wir haben nun die Beziehungen des Äquators und der Ekliptik zu dem neuen System zu erklären. Da sich nach demselben die Himmelskugel nicht wirklich umdreht, so fragt sich zunächst, was die Bedeutung von Achse und Polen sei, um die sie sich zu drehen scheint. Die Antwort hierauf ist, daß die Himmelspole die beiden Punkte unter den Sternen angeben, nach welchen die Erdachse gerichtet ist. In Fig. 18 seien n und s Nord- und Südpol der Erde; verlängert man

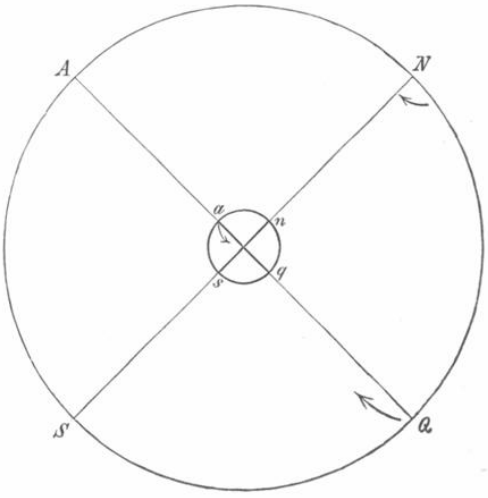


Fig. 18.

die durch sie gegebene Erdachse bis an die scheinbare Himmelskugel, so sind N und S Nord- und Südpol an derselben. Ebenso gibt, wenn aq der Erdäquator ist, seine verlängerte Richtung den Himmelsäquator AQ, der die Himmelskugel in zwei Hälften teilt. Dreht sich nun die Erde um ihre Achse ns (wie der kleine Pfeil andeutet), so wird sich die Himmelskugel um ihre gedachte Achse NS, aber in umgekehrter Richtung zu drehen scheinen, und zwar Punkte (Sterne) in der Nähe des Poles sehr wenig (Polarstern), Punkte am Äquator am schnellsten (wie die Pfeile bei N und Q andeuten), ganz entsprechend der Bewegung von ähnlich liegenden Punkten der Erdoberfläche. Da der Pol das ganze Jahr hindurch am Himmelsgewölbe unverändert an derselben Stelle erscheint, so folgt, daß bei der Bewegung der Erde um die Sonne die Erdachse stets dieselbe absolute Richtung behält (s. Fig. 19). Früher sahen wir jedoch (S. 16), daß

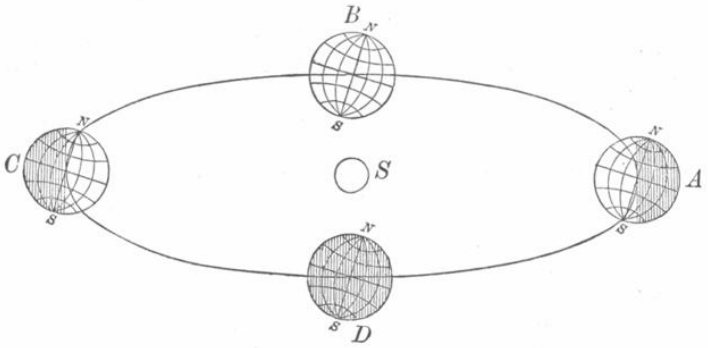


Fig. 19. Bahn der Erde um die Sonne.

eine sehr langsame, aber fortdauernde Bewegung des Pols unter den Sternen, die Präzession, existiert; daraus folgt, daß die Richtung der Erdachse sich im Laufe der Jahre allmählich verändert.

Wir wollen jetzt etwas näher die Beziehung der Erde zur Sonne, den Wechsel der Jahreszeiten, die Äquinoktien usw. betrachten. Wie früher (S. 13) beschrieben, scheint sich die Sonne in einem Ekliptik genannten Kreise in einem Jahre um die Himmelskugel zu bewegen. Ekliptik und Himmelsäquator sind unter einem Winkel von etwa $23^1/_2{}^\circ$ gegeneinander geneigt, das heißt, die Achse der Erde steht nicht senkrecht auf ihrer Bahn, sondern trifft sie unter einem Winkel von etwa $66^1/_2{}^\circ$ (Fig. 19*).

*) Die Verhältnisse der Figur weichen natürlich von den wahren außerordentlich ab; in Wirklichkeit beträgt die Entfernung der Erde von der Sonne etwa 12000mal den Durchmesser der ersteren und 110mal den der letzteren. Gegenüber der unendlich weit entfernten Himmelskugel ist der Durchmesser der Erdbahn nur als Punkt

Die Fig. 19 zeigt die Erde in vier verschiedenen Stellungen auf ihrer Jahresbahn um die Sonne. In der Stellung *A* ist der Südpol *S* der Sonne zugekehrt, und zwar, wie erwähnt, um $23^1/_2{}^\circ$ geneigt, während der Nordpol *N* und die ganze Gegend innerhalb des nördlichen Polarkreises (der vom Pol also $23^1/_2{}^\circ$, vom Äquator $66^1/_2{}^\circ$ absteht) im Dunkel liegt. In dieser Stellung (Dezember) geht demnach die Sonne den Bewohnern der arktischen Zone niemals auf, denen der antarktischen niemals unter; die nördliche Erdhälfte hat Winter, die südliche Sommer. Außerhalb dieser Zonen geht die Sonne auf und unter, und die relative Länge von Tag und Nacht an irgendeinem Erdpunkte kann durch Betrachtung der Kreise, längs deren die betreffenden Orte infolge der täglichen Rotation sich bewegen, genähert erkannt werden. Zu größerer Deutlichkeit ist die Stellung *A* in Fig. 20 vergrößert wiederholt: Die sechs geneigten Linien sind Projektionen der Polarkreise, der Wendekreise und dazwischen der Parallelkreise von ca. 50° (Breite des mittleren Deutschland); *AQ* ist der Äquator, *NS* die Erdachse. Wir sehen, daß ein Punkt auf dem arktischen Kreise, $66^1/_2{}^\circ$ nördliche geographische Breite, gerade die Trennungslinie von Licht und Finsternis einmal in einem Tage berührt; das heißt, die Sonne zeigt sich einmal im Tage gerade im Horizont. Vom Parallelkreise 50° liegen etwa zwei Drittel auf der dunkeln und ein Drittel auf der hellen Seite, und für jeden auf ihm gelegenen Ort sind die Nächte ungefähr doppelt so lang als die Tage. Je weiter wir nach Süden kommen, desto größer werden die im Hellen und desto kleiner die im Dunkeln liegenden Teile der Kreise, desto länger also die Tage und desto kürzer die Nächte, bis endlich am Äquator beide gleich werden. Vom Äquator nach Süden zu kehren sich die Verhältnisse um: die Tage werden um so länger, die Nächte um so kürzer, je näher wir dem Südpole kommen, und auf dem Südpolarkreise, also unter $66^1/_2{}^\circ$ südlicher Breite, liegende Punkte haben die Sonne nur einmal in 24 Stunden am Horizont, sonst stets über ihm. Zwischen Südpolarkreis und Südpol selbst endlich geht die Sonne in dieser Zeit überhaupt nicht unter. Dies ist demnach der Sommer für die südliche, der Winter für die nördliche Erdhälfte.

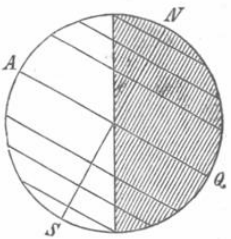


Fig. 20.

Wir gehen nun, drei Monate weiter, zu der Stellung *B* (Fig. 19), welche die Erde gegen Ende März einnimmt. Verlängert man hier die Ebene des Äquators, so geht sie direkt durch die Sonne; letztere erscheint

zu betrachten; die bis zur Sphäre verlängert gedachten Richtungen der Erdachse oder des Erdäquators treffen daher stets dieselben Punkte bzw. denselben Kreis.

somit im Himmelsäquator. Alle Parallelkreise liegen jetzt zur Hälfte in der dunkeln Hemisphäre, die in der Figur nicht sichtbar ist. Tage und Nächte sind demnach auf der ganzen Erde von gleicher Länge. In der Stellung *C*, welche die Erde im Juni einnimmt, ist alles wie in *A*, nur sind die Erscheinungen in beiden Hemisphären die umgekehrten; da jetzt der Nordpol der Sonne zugewendet ist, so hat nun die nördliche Halbkugel die längsten Tage, die südliche die längsten Nächte. In *D* endlich, wohin die Erde im September gelangt, sind Tage und Nächte wiederum von gleicher Länge wie in *B*, und aus dem gleichen Grunde. Die Figur zeigt hier entsprechend nur die dunkle Erdhälfte. So sind alle die scheinbar verwickelten Erscheinungen, die früher beschrieben wurden, vollständig und auf die einfachste Weise durch das neue System erklärt. Wir wollen jetzt sehen, wie dasselbe durch die unmittelbaren Nachfolger des Kopernikus ergänzt und erweitert wurde.

3. Tycho Brahe.

Wir sagten, daß ein großer Fortschritt nach dem Kopernikanischen System nur möglich war auf Grund einer besseren Kenntnis und tieferen Einsicht in die Gesetze der Bewegung oder durch genauere Beobachtungen über die Stellungen der Himmelskörper. In der letzteren Richtung geschah der Fortschritt zuerst, und zwar durch den Dänen Tycho Brahe, der, drei Jahre nach dem Tode des Kopernikus geboren, zu Ende des 16. Jahrhunderts die besten Instrumente, teils selbst erfundene, teils wesentlich verbesserte, über 20 Jahre lang zur sorgfältigen und eifrigen Beobachtung der Himmelskörper verwandte. Da er indessen das Fernrohr noch nicht kannte, so wurden seine Beobachtungen durch die schärferen der folgenden Zeiten weit übertroffen, und sie verdanken Wert und Berühmtheit hauptsächlich dem Umstande, daß sie Kepler die Mittel zur Auffindung der Gesetze der planetarischen Bewegung gewährten.

Als Theoretiker war Tycho nicht glücklich. Er verwarf das Kopernikanische System hauptsächlich aus einem Grunde, der zu seiner Zeit nicht ohne Gewicht war, nämlich wegen der unfaßbaren Entfernung, in der die Fixsterne stehen mußten, wenn dieses System richtig sein sollte. Wir sahen (S. 48), wie sich in der epizyklischen Bewegung der Planeten die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne abspiegelt. Die außerhalb des Sonnensystems befindlichen Fixsterne mußten sich, wenn die Theorie des Kopernikus richtig war, in derselben Weise zu bewegen scheinen. Aber keine Beobachtungen, weder die des Tycho noch die seiner Vorgänger, hatten eine solche Bewegung verraten. Die Anhänger des Koper-

nikus konnten hierauf nur erwidern, die Entfernung der Fixsterne müsse so groß sein, daß die Erdbewegung an ihnen nicht wahrgenommen werden könne, und daß selbst der Durchmesser der Erdbahn nur eine unmerklich kleine Größe gegen den Abstand der Sterne sei. Da eine halbjährliche Ortsveränderung von 3 bis 4 Bogenminuten, also etwa dem neunten Teile des Monddurchmessers, von Tycho sehr wohl entdeckt werden konnte, so mußte man die Entfernung der Fixsternsphäre mindestens 1000mal größer als die der Sonne oder mindestens 100mal größer als die des Saturn, des äußersten damals bekannten Planeten, annehmen. Daß ein so weiter leerer Raum zwischen der Saturnbahn und den Fixsternen liegen sollte, schien vollkommen unglaublich; denn für die Naturphilosophen galt seit Aristoteles als Axiom, der Natur widerstrebe die Leere, und sie lasse einen leeren Raum nicht unausgefüllt. Gleichwohl waren die Gründe des Kopernikus für die Bewegung der Erde zu überzeugend, als daß sie hätten beseitigt werden können. Tycho stellte deshalb ein System auf, welches sich aus dem Ptolemäischen und Kopernikanischen zusammensetzte; er nahm an, die fünf Planeten bewegten sich zwar um die Sonne, die Sonne selbst sei aber in Bewegung um die Erde, die demnach in Ruhe im Mittelpunkte des Universums bleibe.

Vielleicht war es ein Glück für die Lehre des Kopernikus, daß die astronomischen Instrumente des Tycho nicht auf einer höheren Stufe der Vollendung standen. Hätte er gefunden, daß die jährliche Parallaxe der Fixsterne noch nicht eine Sekunde beträgt, und daß dieselben also mindestens 200000mal weiter von der Erde entfernt sein müssen als die Sonne, so würde die astronomische Welt, die zur plötzlichen Erweiterung ihres kosmischen Ideenkreises auf solche Ausdehnung noch nicht fähig und reif war, staunend gestanden und schließlich gefolgert haben, Ptolemäus müsse im Recht, Kopernikus im Irrtum sein.

Tycho bildete sein System nie aus, und es ist schwer zu sagen, was er gegen die vielfachen möglichen Einwendungen vorgebracht haben würde. Er hatte, außer unter Theologen, kaum Anhänger von irgendwelcher Bedeutung; die Erfindung des Fernrohrs beseitigte die letzten Zweifel an der Richtigkeit des Kopernikanischen Systems, ehe ein neues hätte Fuß fassen können.

4. Kepler.

Es bedurfte eines eigentümlichen Zusammentreffens von Umständen, um verhältnismäßig bald nach dem Bekanntwerden der Kopernikanischen Lehre einen weiteren Ausbau dieser Errungenschaft zu ermöglichen. Vor allem war hierzu ein Mann erforderlich wie Kepler, von tief spekulativem

Geiste, streng mathematisch geschult, unermüdlich und von eisernem Fleiße. Erforderlich war es ferner, daß dieser Mann gegen alle Widerwärtigkeiten eines mühevollen und unruhigen Daseins mit einer festen und heiteren Entschlossenheit gerüstet war; denn in den damaligen schwierigen Zeitläuften hätte jeder andere, weniger energische und ausdauernde Geist dem gleichzeitigen Kampfe mit der ihm feindlich gesinnten Geistlichkeit und mit den Sorgen um das tägliche Brot unterliegen müssen. Und gleichzeitig haben wir es den Schwierigkeiten zu danken, die Kepler schon in frühester Jugend trafen, daß die Gesetze der Planetenbewegung bereits zu Anfang des 17. Jahrhunderts erkannt wurden: andernfalls würde Kepler wohl niemals als Gehilfe und später als Nachfolger Tychos nach Prag gekommen sein, und die vorzüglichen Beobachtungen Tychos wären wahrscheinlich nicht in dieser genialen Weise verwertet worden.

Als Tychos Nachfolger hatte er die Verpflichtung übernommen, aus dessen Beobachtungen neue Planetentafeln zu berechnen, und dieser Verpflichtung ist Kepler in der mustergültigsten Weise nachgekommen; er hat mit den Tychonischen Beobachtungen das Äußerste geleistet, was sie bieten konnten, er hat aus ihnen seine berühmten Gesetze der Planetenbewegung abgeleitet. Kopernikus hatte, wie wir gesehen, die Hypothese der Alten angenommen, daß alle himmlischen Bewegungen aus gleichförmigen Kreisbewegungen zusammengesetzt seien, und war so genötigt worden, einen kleinen Epizykel einzuführen, der die Unregelmäßigkeiten der Bewegung erklären sollte. Tychos Beobachtungen übertrafen nun die seiner Vorgänger so weit, daß sie Kepler das Ungenügende dieser Annahme deutlich zeigten. Mit glücklichem Griff wählte er den Mars, welcher der Erde nahe kommt, und dessen Bahn eine starke Exzentrizität besitzt. Der einzige Weg, auf welchem er vorwärts kommen konnte, war, über die Bahn, in der der Planet sich bewegt, und über seine Geschwindigkeit an verschiedenen Punkten der Bahn verschiedene Hypothesen zu machen, aus ihnen die Stellungen und Bewegungen des Planeten, wie sie von der Erde erscheinen, zu berechnen und dann die so berechneten mit den wirklich beobachteten Stellungen zu vergleichen. Da unsere heutigen Logarithmentafeln, durch welche solche Berechnungen außerordentlich abgekürzt werden, damals noch nicht existierten, so kostete jeder Versuch mit einer Hypothese eine ungeheuere Arbeit. Indem er auf diese Weise fand, daß die Form der Bahn sicher nicht kreisförmig war, sondern elliptisch, wurde er dazu geführt, zu untersuchen, was es ausmachte, wenn er die Sonne in den einen Brennpunkt der Ellipse stellte. Hierdurch wurde nun in der Tat die Bewegung des Planeten dargestellt, wenn seine Geschwindigkeit als veränderlich angenommen wurde, und zwar um so größer,

je näher der Planet der Sonne ist. Nach vielen mühsamen Rechnungen gelangte er so zu den beiden ersten seiner berühmten drei Gesetze der planetarischen Bewegung, die er in seinem Werke »Astronomia nova . . . de motibus stellae Martis, Pragae 1609« veröffentlichte.

1. Die Bahn jedes Planeten ist eine Ellipse mit der Sonne in einem der Brennpunkte.

2. Bei der Bewegung um die Sonne beschreibt der Radiusvektor eines Planeten in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume.

Es sei PA (Fig. 21) die Ellipse, in der sich ein Planet bewegt, und in dem einen Brennpunkte S stehe die Sonne. Im Punkte P, dem *Perihelium*, ist der Planet der Sonne am nächsten. Von hier entfernt er sich, über $abcd$, bis er in A, dem *Aphelium*, am weitesten von der Sonne absteht. Dann nähert er sich ihr allmählich wieder durch den anderen Teil seiner Bahn und erreicht endlich wieder das Perihel, um den Lauf in gleicher Weise ohne Aufhören fortzusetzen.

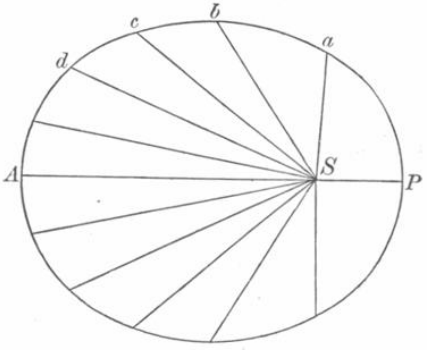


Fig. 21.

Von P ausgehend, wollen wir nun die Stellung des Planeten in seiner Bahn am Schlusse von gleichen Zeitintervallen, z. B. von je 30 Tagen, betrachten. Es seien $abcd$ die vier ersten der Stellungen, die der Planet nach je 30 Tagen erreicht. Verbinden wir diese Punkte wie auch P mit der Sonne durch Linien (*Radii vectores*), so erhalten wir vier Flächenräume, die der Radiusvektor des Planeten in je 30 Tagen überstreicht, und die nach dem zweiten Keplerschen Gesetz einander gleich sind.

Erst zehn Jahre später fand Kepler auf rein spekulativem Wege*) das letzte seiner drei Gesetze, welches eine Relation zwischen den Bahnen

*) Mit begeisterter Schwärmerei sagt er selbst in seinem Werke »Harmonices mundi Libri V, Lincii 1619« darüber: »Endlich also habe ich das ans Licht gebracht und über all mein Hoffen und Erwarten als wahr befunden, daß die ganze Natur der Harmonien in ihrem ganzen Umfange und nach allen ihren Einzelheiten in den himmlischen Bewegungen vorhanden ist, nicht zwar auf die Weise wie ich mir's früher gedacht, sondern auf eine ganz andere durchaus vollkommene Weise« . . . »Verzeiht ihr, so freut mich's, zürnet ihr, so trag' ich's; hier werfe ich die Würfel und schreibe ein Buch, zu lesen der Mitwelt oder der Nachwelt, gleichviel; es wird seines Lesers Jahrtausende harren, wenn Gott selbst sechs Jahrtausende lang den erwartet hat, der sein Werk beschaute.«

der verschiedenen Planeten darstellt. Schon Kopernikus wußte, daß die Umlaufszeit eines Planeten um so größer ist, je weiter er von der Sonne absteht, und zwar nicht nur, weil die Bahn von größerem Umfange, sondern auch, weil die Bewegung wirklich eine langsamere ist. Saturn z. B., $9^1/_2$mal so weit von der Sonne entfernt als die Erde, würde bei gleich schneller Bewegung seinen Umlauf um die Sonne in $9^1/_2$ Jahren vollenden; er braucht aber in Wirklichkeit über 29 Jahre. Er bewegt sich also noch nicht mit einem Drittel der Erdgeschwindigkeit. Kopernikus fand indessen die zwischen Entfernungen und Umlaufszeiten bestehende Beziehung nicht auf, welche Kepler so aussprach:

3. Die Quadrate der Umlaufszeiten der Planeten verhalten sich wie die Kuben (dritten Potenzen) ihrer mittleren Entfernungen von der Sonne.

Die Übereinstimmung dieses Gesetzes mit der Wirklichkeit zeigt die folgende Tabelle, welche die mittleren Entfernungen, wie sie Kepler bekannt waren, in Einheiten der mittleren Erdentfernung, die Umlaufszeit oder Revolutionsperiode (Einheit das Erdjahr), sowie die Kuben der ersteren und die Quadrate der letzteren enthält:

Planeten	Distanz	Periode	Kubus der Distanz	Quadrat der Periode
Merkur	0.387	0.241	0.058	0.058
Venus	0.723	0.615	0.378	0.378
Erde	1.000	1.000	1.000	1.000
Mars	1.524	1.881	3.540	3.538
Jupiter	5.203	11.86	140.8	140.66
Saturn	9.539	29.46	868.0	867.9

So war also die alte Theorie, daß die Bewegungen der Himmelskörper in Kreisen erfolge oder wenigstens in Bahnen, die aus Kreisen zusammengesetzt sind, mit Keplers Gesetzen für immer beseitigt. Die Ellipse trat an die Stelle des Kreises und eine veränderliche Bahnbewegung an die Stelle der gleichförmigen.

5. Von Kepler bis Newton.

Soweit die Bestimmung der Gesetze der planetarischen Bewegungen nach dem damaligen Stande der astronomischen Beobachtung möglich war, ließ Kepler fast nichts zu tun übrig. War Lage und Größe der elliptischen Bahn, in der sich ein Planet bewegt, sowie der Punkt der Bahn gegeben, an dem er sich zu irgendeiner Zeit befindet, so war man zu jener Zeit

zu dem Glauben berechtigt, daß es möglich sei, die Position des Planeten für alle zukünftigen Zeiten zu berechnen. Mehr als dies konnte die mathematische Wissenschaft damals nicht leisten; sie konnte nur eine geometrische Deutung, keine mechanische Erklärung der Bewegungserscheinungen liefern. Es ist wahr, daß die auf solche Art vorausgesagten Stellungen der Planeten nicht in voller Übereinstimmung mit den beobachteten gefunden wurden; und hätte Kepler über die genaueren Beobachtungen der Jetztzeit verfügt, so würde er gesehen haben, daß seine Gesetze die planetarischen Bewegungen nur annähernd richtig darstellen. Er würde nicht allein bemerkt haben, daß die elliptischen Bahnen ihre Lage im Raume allmählich ändern, sondern auch, daß die Planeten bald nach einer, bald nach der anderen Richtung abweichen, daß die von den Radiivectores überstrichenen Flächen bald größer, bald kleiner sind, und daß eine Vorausberechnung auf längere Zeit ihm nicht möglich war. So lange aber die Fragen unbeantwortet blieben, warum sich die Planeten in elliptischen Bahnen bewegen, warum die Radiivectores den Zeiten proportionale Flächen beschreiben, warum die im dritten Gesetz ausgesprochene Beziehung zwischen Entfernungen und Umlaufszeiten besteht, so lange mußte es vollends unmöglich sein, zu sagen, warum die Planeten von diesen Gesetzen abweichen. Die Antwort auf jene Fragen war erst möglich, nachdem die zu Keplers Zeiten unbekannten allgemeinen Gesetze der Bewegung klar erkannt waren und die geometrische Anschauungs- und Erklärungsweise einer mechanischen Platz gemacht hatte.

Den ersten großen Schritt in der Erforschung dieser Gesetze tat Galilei, der große Zeitgenosse Keplers. Als Begründer der dynamischen Wissenschaft, als Lehrer und Verteidiger des Kopernikanischen Systems, als Märtyrer dieser Lehre, die er als wahr erkannt hatte und zu verbreiten suchte, ist Galilei vielleicht der interessanteste Charakter seiner Zeit. Jeder an dem Kopernikanischen System etwa noch haftende Zweifel wurde beseitigt durch die Entdeckungen, die Galilei mit dem Fernrohre machte. Die Phasen der Venus zeigten ihm, daß dieser Planet gleich der Erde ein an sich dunkler, kugelförmiger Körper ist, der sein Licht von der Sonne erhält. In Jupiter und seinen Satelliten war das Sonnensystem, wie Kopernikus es darstellte, in kleinem Maßstabe und mit einer Treue wiederholt, die den denkenden Beobachter überraschen mußte. Aus keiner vertrauenswerten Quelle konnte fernerhin Material zu einem Widerspruch gegen die neue Lehre geschöpft werden. Die Inquisition verbot zwar ihre Verbreitung als absolute Wahrheit, war aber damit einverstanden, sie als Hypothese bei der Berechnung der Bewegungen der Himmelskörper zuzulassen. Nur sollte nicht die Behauptung vertreten werden dürfen, daß diese Hypothese der Wirklichkeit ent-

spräche. Da aber diese Behauptung in dem großen Werke des Kopernikus enthalten war, so verurteilte die Inquisition das Werk in seiner ursprünglichen Gestalt, bis gewisse Stellen verbessert seien. Eine korrigierte Ausgabe ist aber nie erschienen, und so blieb das Buch des Kopernikus volle zwei Jahrhunderte hindurch auf dem »Index librorum prohibitorum«. Das allgemeine Verbot von Büchern über das heliozentrische System verschwand 1758 vom Index. Im Jahre 1822 wurde in Rom der Druck eines Buches zu gunsten des Kopernikanischen Systems ausdrücklich gestattet. Endlich, im Jahre 1835, fand man sich veranlaßt, das veraltete Verbot gegen die betreffenden Schriften von Kopernikus, Kepler und Galilei in der neuen Indexausgabe zu streichen.

Den ersten Versuch, die Bewegungen der Himmelskörper auf eine allgemeine Ursache oder ein Grundgesetz zurückzuführen, machte Descartes (Cartesius) in seiner berühmten Wirbeltheorie, die für einige Zeit sogar der Gravitationstheorie das Feld streitig machte. Dieser Philosoph nahm an, die Sonne (wie die übrigen Fixsterne) befinde sich in einem feinen, nach jeder Richtung unermeßlich ausgedehnten Fluidum. Durch ihre Rotation setze sie die zunächst liegenden Teile des Fluidums in rotierende Bewegung; diese teilten ihre Bewegungen entfernteren Partikeln mit, bis schließlich die ganze Masse wie ein Strudel oder Wirbel rotiere. In diesem Ätherwirbel würden die Planeten um die Sonne getragen. Die entfernteren Planeten bewegten sich langsamer, weil die entfernteren Teile des Äthers durch die Rotation der Sonne weniger affiziert würden. In dem großen Wirbel des Sonnensystems befänden sich kleinere, mit je einem Planeten im Zentrum, um den sich, im Äther schwimmend, die Satelliten bewegten. Hätte Descartes zeigen können, daß die Teile dieses Wirbels in Ellipsen sich bewegten, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht, daß sie gleiche Flächen in gleichen Zeiten beschrieben, und daß die Geschwindigkeiten sich dem dritten Keplerschen Gesetze gemäß ändern müßten, so würde seine Theorie genügt haben. Da er dies aber nicht vermochte, muß seine Hypothese eher als Rückschritt, denn als Fortschritt der Wissenschaft betrachtet werden. Die hohe Bedeutung des Philosophen Descartes und die große Zahl seiner Schüler sicherten seiner Anschauung indessen große Verbreitung, und wir finden unter ihren Anhängern sogar einen Mathematiker wie Johann Bernoulli.

Galilei legte nun den Grund zur physischen Erkenntnis der planetarischen Bewegungen durch seine epochemachenden Beobachtungen und Forschungen auf dem Gebiete der Bewegungslehre überhaupt. Mit ihm beginnt, wie wir sagen dürfen, für die exakten Wissenschaften das Zeitalter einer gesunden Induktion, nachdem Jahrhunderte lang eine wesent-

lich von Aristoteles inaugurierte Methode der Deduktion und Spekulation geherrscht hatte, die nur dann zur wahren Erkenntnis der Natur hätte führen können, wenn ihr Beobachtung und Experiment zugrunde gelegen hätten, also Induktion vorausgegangen wäre. Galilei stieg aus den Himmelsräumen auf die Erde, maß und untersuchte experimentell die einfachsten Erscheinungen und Vorgänge bei der Bewegung irdischer Körper durch die Schwere: den Fall, das Gleiten, die Schwingung, und fand so die fundamentalen Gesetze der Dynamik, deren Übertragung auf die Himmelskörper und Verallgemeinerung dem Genius Newtons vorbehalten blieb.

Nach Galilei war es hauptsächlich Huygens, der den Weg zur Lehre von der allgemeinen Attraktion ebnete. Als Mathematiker, Physiker und Beobachter gleich groß, nimmt er in der Geschichte der physikalischen Wissenschaften einen hohen Rang ein. Er entdeckte die Gesetze der Zentrifugalkraft, und hätte er diese einfach auf das Sonnensystem angewandt, so würde er zu dem Resultate geführt worden sein, daß die Planeten in ihren Bahnen erhalten werden durch eine Kraft, die im Verhältnis des Quadrats ihrer Entfernung von der Sonne abnimmt. Der Weg zur Theorie der Gravitation hätte danach kaum verfehlt werden können. Aber die große Entdeckung schien einen besonders für sie geschaffenen Geist zu fordern.

KAPITEL III.

Die allgemeine Schwere.

1. Newton.

Die wirkliche Bedeutung von Newtons großer Entdeckung der allgemeinen Schwere oder der *Gravitation* wird nur von wenigen vollkommen gewürdigt. Häufig hat man die Gravitation als eine geheimnisvolle Kraft angesehen, die nur zwischen den Himmelskörpern wirke und zuerst von Newton entdeckt worden sei. Wäre die allgemeine Schwere von Newton nur als ein neues Prinzip, die Bewegungen der Planeten zu erklären, gefunden worden, so wäre sie keine so bewundernswerte Entdeckung gewesen, als sie es wirklich ist. Ein spezieller Fall der Gravitation ist allen bekannt: es ist einfach die Kraft, welche alle schweren Körper fallen oder gegen den Erdmittelpunkt streben läßt. Jeder, der nur einmal einen Stein fallen sah oder das Gewicht desselben fühlte, wußte von der Existenz der Gravitation. Newtons große Tat war, daß er bewies, die Bewegungen der

Himmelskörper seien durch eine allgemeine Kraft bestimmt, von der die Kraft, die den Apfel zur Erde fallen läßt, nur eine Erscheinungsform ist, und daß er auf diese Weise den himmlischen Bewegungen den Schleier des Geheimnisvollen raubte, in den sie früher gehüllt waren. Seinen Vorgängern schien die fortdauernde Bewegung der Planeten in Kreisen oder Ellipsen jeder auf der Oberfläche der Erde wahrgenommenen Bewegung so unähnlich zu sein, daß sie sich gar nicht vorstellen konnten, beides würde durch das gleiche Gesetz beherrscht, und es mußte ihnen, da sie kein Gesetz für die Planetenbewegungen kannten, durchaus glaublich erscheinen, daß die Himmelskörper sich in einer Weise bewegten, die nicht im geringsten mit den Gesetzen irdischer Bewegungen verwandt sei.

Die Vorstellung einer kosmischen, von Sonne oder Erde ausstrahlenden und die Bewegungen der Himmelskörper bedingenden Kraft entsprang zwar keineswegs erst dem Geiste Newtons. Wir sahen, daß selbst Ptolemäus und sogar ältere Philosophen die dunkle Vorstellung von einer Kraft hatten, die stets gegen das Zentrum der Erde oder, was für sie gleichbedeutend war, gegen das Zentrum des Universums gerichtet sei und nicht bloß den Fall schwerer Körper, sondern auch den Zusammenhalt des Weltalls bedinge. Auch Kepler behauptete, von spekulativen Betrachtungen ausgehend, das Vorhandensein einer die Planeten bewegenden Kraft, die in der Sonne ihren Sitz habe und von ihr ausstrahle. Aber weder Ptolemäus noch Kepler konnten auf Grund der um uns wirkenden Gesetze eine einigermaßen befriedigende Erklärung dieser Kraft geben; auch war es in der Tat nicht möglich, eine klare Vorstellung von ihrer wahren Natur zu gewinnen ohne die Kenntnis der allgemeinen Bewegungsgesetze, zu der keiner der beiden Forscher je gelangte.

Der größte Irrtum, der fast alle Forscher bis zu Galileis Zeit gefangen hielt, war der, daß die fortdauernde Wirkung irgendeiner Kraft nötig sei, damit ein sich bewegender Körper in Bewegung erhalten bleibe. Daß selbst Kepler durchaus diese Anschauung teilte, zeigt die Tatsache, daß er eine Kraft, die nur in der Richtung nach der Sonne wirkt, für unzureichend hielt, die planetarischen Bewegungen zu erhalten, und daß er eine ergänzende Kraft für erforderlich erachtete, welche die Planeten beständig vorwärts stößt. Die letztere Kraft, meinte er, könne von der Rotation der Sonne um ihre Achse herrühren. Es ist schwer zu sagen — so allmählich dämmerte die große Wahrheit dem menschlichen Geiste auf —, wer der erste war, der klar einsah und aussprach, daß diese Ansicht vollständig irrig sei, und daß ein Körper, einmal in Bewegung, ohne Gegenwirkung oder Hinzukommen irgendeiner Kraft sich gleichmäßig und unaufhörlich

vorwärts bewegen müsse. Leonardo da Vinci muß diese Wahrheit, eine Folge des Gesetzes der Trägheit, geahnt haben; implicite enthalten war sie in Galileis Fallgesetzen und in der von Huygens aufgestellten Theorie der Zentralkräfte. Aber keiner dieser Forscher, auch Galilei nicht, hat sie unzweideutig und vollständig ausgesprochen, und so dürfen wir wohl sagen, daß erst Newton es war, der dieses Fundamentalgesetz nebst den daraus zu ziehenden Folgerungen vollkommen deutlich darlegte. Die Basis von Newtons Entdeckung bildeten die folgenden drei Bewegungsgesetze:

1. Ein in Bewegung befindlicher Körper, auf den keine Kraft wirkt, bewegt sich geradlinig und mit gleicher Geschwindigkeit unaufhörlich fort. (Trägheitsgesetz.)

2. Wirkt eine Kraft auf einen in Bewegung befindlichen Körper, so findet eine Änderung der aus dem ersten Gesetze folgenden Bewegung statt in der Richtung der Kraft und ihr proportional. (Parallelogramm der Kräfte.)

3. Wirkung und Gegenwirkung sind einander gleich und entgegengesetzt; übt also ein Körper auf einen anderen eine Kraft aus, so übt auch letzterer eine gleiche Kraft, aber in entgegengesetzter Richtung, auf den ersteren aus. (Aktion und Reaktion.)

Das erste dieser Gesetze ist das wichtigste. Der Umstand, der seine Entdeckung so lange verhindert hatte, war, daß es keinen Körper auf der Erde gab, auf den nicht irgendeine Kraft wirkte, und daher keinen, der sich fortdauernd in gerader Linie bewegt hätte. Jeder Körper, mit dem experimentiert werden konnte, war mindestens der Anziehung der Erde, d. h. der Schwere, unterworfen und fiel deshalb alsbald zur Erde. Andere Kräfte, welche seine freie Bewegung hinderten, waren die Reibung und der Luftwiderstand. Besondere Untersuchungen waren daher nötig, um zu zeigen, daß sich der Körper ohne diese Kräfte unaufhörlich geradlinig weiterbewegen würde.

Wir können nun den ebenso einfachen als direkten Weg verstehen, auf welchem Newton von dem, was er auf der Erde sah, zu dem großen Prinzip gelangte, mit welchem sein Name für immer verbunden ist. Wir wissen zunächst, daß auf der Erde eine überall wirksame Kraft besteht, durch welche alle Körper nach dem Mittelpunkte der Erde hingezogen werden. Diese Kraft erstreckt sich ohne merkliche Verminderung bis zu den Spitzen der höchsten Gebäude ebenso, wie bis zu den Gipfeln der höchsten Berge. Die Frage liegt nun nahe, wie weit wohl ihre Wirksamkeit reiche, und ob ihr nicht z. B. auch der Mond unterliege? Wenn dies der Fall wäre, so würde der Mond, gerade wie der von der Hand in die

Höhe geworfene Stein, wie der vom Baume fallende Apfel*) der Erde zustreben. Und sollte dann nicht diese einfache Kraft der Schwere auch die sein, die den Mond in seiner Bahn erhält, und die ihn hindert, dem ersten Bewegungsgesetze gemäß in gerader Linie wegzufliegen? Zur Beantwortung dieser Frage war es nötig, zu berechnen, welche Kraft erforderlich ist, um den Mond in seiner Bahn zu erhalten, und sie mit der Schwerkraft zu vergleichen. Wohlbekannt war den Astronomen jener Zeit, daß die Entfernung des Mondes 60 Erdhalbmesser beträgt; der Erdhalbmesser selbst war aber nicht genau bekannt. Newton nahm anfangs irrtümlich den Durchmesser der Erde zu 10500 km**) an, und aus diesem Grunde konnten ihm seine Berechnungen nicht das richtige Resultat geben. Dies geschah 1666, als er erst 23 Jahre alt war. Nahezu 20 Jahre ließ er seine Rechnungen liegen und nahm sie erst wieder auf, als ihm die Messungen des Franzosen Picard bekannt wurden, welche den Erddurchmesser um ein Fünftel größer ergaben, als früher angenommen wurde. Jetzt***) fand er den Betrag der Abweichung der Mondbahn von einer geraden Linie zu 4.9 m in einer Minute, d. h. ein Körper in der Entfernung des Mondes würde in der ersten Minute 4.9 m zur Erde hin fallen, eine Strecke, die ein Körper an der Erdoberfläche in einem Sechzigstel dieser Zeit, nämlich in einer Sekunde, durchfällt. Da die Fallräume sich wie die Quadrate der Zeiten verhalten, so folgt, daß die Kraft der Schwere an der Erdoberfläche 60 mal 60 oder 3600 mal so groß ist als die Kraft, die den Mond in seiner Bahn erhält. Da nun aber auch die Entfernung des Mondes vom Erdmittelpunkte 60 mal so groß ist als die der Erdoberfläche vom Mittelpunkte, so folgt: Die Kraft, welche den Mond in seiner Bahn erhält, ist dieselbe, welche einen Stein zur Erde fallen läßt, nur verringert im Verhältnis des Quadrats der Entfernung vom Mittelpunkte der Erde.

Für den Mathematiker ist der Übergang von der einen Stein oder Apfel beeinflussenden Schwerkraft zu der den Mond bewegenden Kraft sehr einfach; der Nichtmathematiker aber wird vielleicht nicht gleich sehen, wie der Mond beständig zur Erde fallen kann, ohne ihr je näher

*) Newton soll bekanntlich durch den Fall eines Apfels zuerst (1666) auf den Gedanken gebracht worden sein, hier wirke die gleiche Kraft wie beim Monde.

**) Lineare Größen sind in diesem Werke in der Regel in Kilometern (km), Metern (m) usw. angegeben. 1 km = 0.135 geogr. Meile = 0.621 engl. Meile; 1 geogr. Meile = 7.42 km = 4.61 engl. Meilen; 1 engl. Meile = 1.61 km = 0.217 geogr. Meile. 1 m = 3.078 Par. Fuß = 3.186 rheinl. Fuß = 3.281 engl. Fuß; 1 cm = 0.369 Par. Zoll = 4.433 Par. Linien; 1 cm = 0.394 engl. Zoll.

***) Sein grundlegendes Werk »Philosophiae naturalis Principia mathematica« ist 1687 in London erschienen.

zu kommen. Die Figur 22 mag zur Erläuterung dienen. Jeder kann das Fallgesetz schwerer Körper begreifen, wonach ein Körper 5 m in der ersten Sekunde, dreimal so viel oder 15 m in der zweiten, 25 m in der dritten usw. fällt. Nehmen wir an, der Körper falle nicht, sondern werde, wie eine Kanonenkugel, horizontal fortgeschleudert, so würde er infolge der Schwere während der ersten Sekunde 5 m von der geraden Linie, in der er geschleudert wurde, abweichen oder fallen, dreimal so viel in der nächsten Sekunde, fünfmal in der dritten usw., ebenso, als wenn er aus der Ruhelage gefallen wäre. Es sei AB (Fig. 22) ein Teil der Erdoberfläche und AD eine Gerade tangential an A oder die Richtung, in welcher ein Beobachter durch ein horizontal gestelltes Fernrohr sehen würde. Die Oberfläche wird dann infolge der Krümmung der Erde von dieser Gesichtslinie am Ende des ersten Kilometers um etwa 8 cm, am Ende des zweiten um noch 24 cm mehr usw. abweichen. In 8 km Abstand wird die Ab-

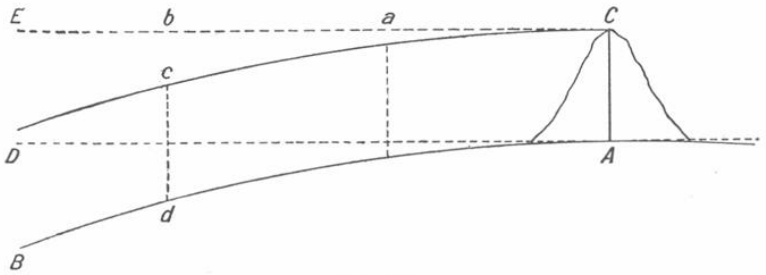


Fig. 22.

weichung auf 5 m gestiegen sein. In einem Abstande von 16 km kommt noch das Dreifache dieses Betrages hinzu, und die Abweichung wird im ganzen 20 m ausmachen usw. Die Abweichung folgt also dem gleichen Gesetze wie ein freifallender Körper. Von einem erhöhten Standpunkte C aus werde nun eine Kanonenkugel in horizontaler Richtung CE abgefeuert. Je größer ihre Geschwindigkeit ist, desto weiter wird sie kommen, ehe sie die Erde erreicht. Wir wollen nun annehmen, sie könnte mit solcher Kraft abgeschossen werden, daß ihre Geschwindigkeit 8 km in der Sekunde beträgt, und die Luft leiste keinen Widerstand. In 8 km Abstand von C liege auf CE der Punkt a; da sie diesen in einer Sekunde erreicht, so folgt aus dem Fallgesetze, daß sie in dieser Zeit bis auf 5 m unter CE gefallen ist. Wir haben aber eben gesehen, daß die Erde selbst in dieser Entfernung sich 5 m wegkrümmt. Die Kugel ist demnach nicht näher an der Erde, als im Moment des Abfeuerns. Während der nächsten Sekunde würde die Kugel nach b gelangen, infolge der Schwere aber um weitere 15 m, im ganzen also um 20 m, bis zum Punkte c, fallen. Aber auf diese Strecke

hat sich auch die Erdoberfläche um weitere 15 m gekrümmt, so daß die Entfernung *cd* wiederum gleich *CA* ist. So würde, wenn kein Widerstand stattfände, die Kugel in unveränderter Geschwindigkeit und gleicher Entfernung von der Erdoberfläche weiter gehen; sie würde stets um denselben Betrag fallen, um den sich die Erde wegkrümmt. Schließlich käme sie auf kreisförmiger Bahn rings um die Erde und erreichte nach Verlauf von $1^h\ 24^m$ wieder den Punkt *C*. Die Kugel wäre demnach gleichsam ein Satellit der Erde geworden, wie der Mond, nur viel näher und mit weit geringerer Umlaufszeit. Der Kraft, welche die Kanonenkugel geradlinig fortschleudert, entspricht beim Monde ein ursprünglicher Impuls oder Stoß, demzufolge er sich, ohne die Einwirkung der Erde, nach dem ersten Bewegungsgesetz in gerader Linie unaufhörlich weiter bewegen würde.

Ein weiterer Schritt führt uns zu der Erkenntnis, daß die Gravitation auch für andere Körper als die Erde gültig ist. Die Planeten bewegen sich um die Sonne, wie der Mond um die Erde, und müssen demnach einer gegen die Sonne gerichteten Kraft gehorchen. Diese Kraft kann nichts anderes sein, als die Gravitation oder die Anziehung der Sonne selbst. Eine einfache Rechnung nach Keplers drittem Gesetze zeigt, daß die Kraft, mit welcher die Planeten gegen die Sonne gravitieren, sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer mittleren Entfernungen verhält.

Es fragt sich jetzt nur noch, welche Art von Bahn ein Planet beschreiben wird, wenn eine Kraft von der erwähnten Beschaffenheit ihn um die Sonne führt. Eine nähere Untersuchung lehrt nun, daß, wenn die sonst ganz beliebige Kraft nur beständig nach der Sonne gerichtet ist, der Radiusvektor des Planeten stets gleiche Flächen in gleichen Zeiten überstreichen wird. Und umgekehrt kann er nicht gleiche Flächen in gleichen Zeiten beschreiben, wenn die Kraft in einer anderen Richtung als nach der Sonne hin wirkt. Nach Keplers zweitem, aus der Beobachtung abgeleiteten Gesetze folgt demnach, daß die Kraft in der Tat gegen die Sonne selbst gerichtet ist.

Das Problem nun, die Form der Bahn zu bestimmen, die beschrieben werden muß, vermochten nur sehr wenige Mathematiker des 17. Jahrhunderts einigermaßen genügend zu behandeln. Newton gelang es indessen, auf strengem Wege nachzuweisen, daß die Bahn allgemein ein Kegelschnitt*) sein müsse, und zwar je nach den Umständen eine Ellipse, eine Parabel oder eine Hyperbel, mit der Sonne in einem der Brennpunkte; hiermit war das erste Gesetz Keplers in der allgemeinsten Form bewiesen. So verschwand alles Geheimnisvolle aus den himmlischen Bewegungen, und die Planeten erwiesen sich einfach als schwere Körper, die sich nach

*) Über die Kegelschnitte wird S. 90f. einiges erwähnt werden.

denselben Gesetzen bewegen, die wir um uns wirksam sehen, aber unter ganz anderen Bedingungen. Alle drei Gesetze Keplers waren enthalten in dem einzigen Gesetze der Gravitation, welche umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung wirkt.

Sehr schön erklärt die Lehre von der allgemeinen Schwere Keplers drittes Gesetz. Wie wir sahen, ist der Quotient der Quadrate der Umlaufszeiten in die Kuben der mittleren Entfernungen für alle Planeten derselbe. Wenden wir dies auf die Satelliten des Jupiter an, indem wir die Distanz jedes derselben vom Jupiter in die dritte Potenz erheben und diesen Kubus durch das Quadrat der Umlaufszeit teilen, so wird zwar auch hier der Quotient für jeden Satelliten derselbe, aber nicht derselbe wie bei den Planeten. Dieser Quotient ist nämlich der Masse oder dem Gewichte des Zentralkörpers proportional. Im Falle der Planeten ist er 1047 mal so groß als bei den Jupiters-Satelliten, weil die Masse oder das Gewicht der Sonne 1047 mal das des Jupiter ist. Das oben angeführte dritte Keplersche Gesetz bedarf daher noch eines ergänzenden, die Massen berücksichtigenden Faktors*), welcher sich Kepler nur deshalb nicht zu erkennen geben konnte, weil diese Massen im Verhältnis zur Sonnenmasse sehr klein sind. Wir besitzen somit in diesem Gesetze einen sehr bequemen Weg zur Bestimmung der Masse oder des Gewichtes aller mit Trabanten versehenen Planeten. Die Masse wird dabei in Bruchteilen der als Einheit genommenen Sonnenmasse ausgedrückt.

Aber auch in dieser Form ist das Gesetz noch nicht vollständig; es muß dahin verallgemeinert werden, daß in einem abgeschlossenen System (Sonnensystem) jeder Körper alle anderen anzieht und von allen anderen angezogen wird. Wegen dieser allgemeinen Anziehung finden Bewegungsänderungen aller Planeten statt, infolge deren ihre Bahnen die Keplerschen Gesetze nicht genau befolgen. Es ist nun aus der Beobachtung bekannt, daß in der Tat die Planeten sich nicht genau nach den Keplerschen Gesetzen bewegen. Die Frage ist also schließlich die, ob die gegenseitige Anziehung der Planeten diese Abweichungen vollständig und genau erklärt. Diese Frage konnte Newton nur in unvollkommener Weise beantworten, da das Problem für seine mathematischen Kenntnisse, wie überhaupt für die der damaligen Zeit, zu verwickelt war. Er vermochte zu

*) In mathematischer Sprache lautet das dritte Keplersche Gesetz streng:

$$\frac{a^3}{T^2(1+m)} = \frac{a'^3}{T'^2(1+m')} = \frac{a''^3}{T''^2(1+m'')} = \ldots = \text{Const.},$$

wo a, a′, a″ ... die halben großen Achsen, T, T′, T″ ... die Umlaufszeiten, m, m′, m″ ... die Massen der Planeten in Teilen der zu 1 angenommenen Sonnenmasse bedeuten. Die Keplersche Näherungsform setzt $m = m' = m'' = \ldots = 0$.

zeigen, daß die Anziehung der Sonne Ungleichheiten in der Bewegung des Mondes um die Erde von der Art verursachen müsse, wie die Beobachtungen sie wirklich ergaben, aber er konnte ihren Betrag nicht genau berechnen. Doch war die allgemeine Übereinstimmung seiner Theorie mit den Bewegungen der Himmelskörper so überraschend, daß ein Zweifel an ihrer Wahrheit nicht hätte eintreten sollen. Es ist demnach sehr merkwürdig, daß die Pariser Akademie der Wissenschaften noch 1732 — mehr als 40 Jahre nach Newtons Entdeckung — dem berühmten Mathematiker Johann Bernoulli einen Preis erteilte für eine Abhandlung, in welcher die Planetenbewegungen auf Grund der Cartesianischen Wirbeltheorie erklärt wurden. Es braucht daraus nicht gefolgert zu werden, daß die Akademie diese Theorie noch als richtig betrachtete; allein das dürfen wir schließen, daß sie die Gravitationstheorie noch als offene Frage ansah.

Um Newtons Gesetz vollständig auszudrücken, genügt es nicht, einfach zu sagen, daß Sonne, Erde und Planeten sich gegenseitig anziehen. Man mag die Materie soweit teilen, als man will, immer wird man finden, daß sie Anziehung erfährt und ausübt, weil sie Masse hat. Da die Erde auch die kleinsten Teilchen noch anzieht, so müssen auch diese, nach dem dritten Gesetze der Bewegung, die Erde ihrerseits mit entsprechender Kraft anziehen. Wir schließen daraus, daß die Kraft der Attraktion nicht in der Erde als Ganzem ruht, sondern in jedem individuellen Teilchen der sie zusammensetzenden Masse; das heißt, die Anziehung der Erde auf einen Stein z. B. ist einfach die ganze Summe der Anziehungen zwischen dem Stein und allen die Erde bildenden Teilchen*).

Aus dem Gesetze der Gravitation folgt, daß theoretisch eine Grenze der Entfernung, bis zu welcher sich die allgemeine Anziehung erstreckt, nicht existiert. Die Anziehung der Sonne auf die äußersten der bekannten Planeten, Uranus und Neptun, zeigt nicht die geringste Abweichung vom Newtonschen Gesetz. Bei der außerordentlich schnellen Abnahme aber, welche die Anziehung erleidet, ist, wenn wir Entfernungen wie die der Fixsterne in Betracht ziehen, die Attraktion der Sonne ohne wahrnehmbare Wirkung.

Vollständig ausgesprochen heißt also das Gesetz der allgemeinen Anziehung oder der Gravitation:

Jedes materielle Teilchen im Universum zieht jedes andere mit einer Kraft an, die direkt proportional ist dem Produkte der Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres gegenseitigen Abstandes.

*) Von der allgemeinen Schwere muß man aber die sogenannte Molekularattraktion unterscheiden, d. h. die Anziehung, welche zwischen den kleinsten Teilchen der Materie (den Molekülen) und nur in unmeßbar kleiner Entfernung stattfindet.

2. Anziehung kleiner Massen. Dichtigkeit der Erde.

Um den vollständigen Beweis zu liefern, daß Attraktion wirklich jedem materiellen Teilchen eigen ist, war es wünschenswert, durch das Experiment zu zeigen, daß isolierte Massen in der Tat einander so, wie es Newtons Gesetz erfordert, anziehen. Dieses Experiment ist auf verschiedenem Wege erfolgreich ausgeführt worden, zunächst freilich weniger in der Absicht, die Existenz der Attraktion nachzuweisen, als die mittlere Dichte der Erde zu bestimmen. Die Anziehung einer Kugel auf einen Punkt ihrer Oberfläche ist, wie die Mathematik lehrt, dieselbe, als wenn die ganze Masse der Kugel in ihrem Mittelpunkte vereinigt wäre. Sie verhält sich demnach direkt wie die ganze Summe der materiellen Teile der Kugel, oder wie ihr Gewicht, und umgekehrt wie das Quadrat ihres Halbmessers. Wir wollen nun die Anziehung zweier Kugeln aus gleichem Material betrachten, von denen die eine den doppelten Durchmesser der anderen hat. Da der Inhalt einer Kugel proportional der dritten Potenz das Radius wächst, so folgt, daß die größere achtmal den Rauminhalt und also auch achtmal die Masse oder das Gewicht der kleineren hat. Andererseits aber ist ein Oberflächenteil der größeren Kugel doppelt so weit vom Mittelpunkte entfernt, als einer der kleineren, die Anziehung also aus diesem Grunde nur ein Viertel. Verbinden wir nach dem Attraktionsgesetze diese beiden Anziehungsfaktoren, so ergibt sich, daß die Anziehung auf ein Oberflächenteilchen der größeren Kugel doppelt so groß ist ($8 \times 1/4$), als diejenige auf ein Teilchen der kleineren; die Anziehungen verhalten sich also direkt wie die Durchmesser der Kugeln, wenn die Dichtigkeiten gleich sind, das heißt, wenn derselbe Raum in beiden Kugeln dieselbe Masse enthält. Sind die Dichtigkeiten nicht gleich, so ist die Attraktion proportional dem Produkt von Dichtigkeit und Durchmesser.

Der Durchmesser der Erde beträgt rund 13 Millionen Meter. Die Anziehung, welche eine Kugel von derselben Dichtigkeit, aber von 1 m Durchmesser, auf einen Punkt an seiner Oberfläche ausübt, wird demnach ein Dreizehnmilliontel der Erdanziehung sein oder ein Dreizehnmilliontel des Gewichtes des angezogenen Körpers. Mäßen wir also z. B. die Anziehungskraft einer Bleikugel von der angegebenen Größe und fänden sie genau zu einem Dreizehnmilliontel von dem Gewicht des angezogenen Körpers, so würden wir schließen, daß die durchschnittliche oder mittlere Dichte der Erde gleich jener des Bleies wäre. In Wirklichkeit aber wird jene Anziehung nahe zweimal so groß gefunden; es ist folglich das Blei etwa zweimal so dicht, als das Mittel der die Erde zusammensetzenden Bestandteile.

Der Physiker Cavendish, der zuerst (1798) die Dichtigkeit der Erde auf diese Art bestimmte, bediente sich dabei eines Apparates, den Fig. 23 in der ihm späterhin von Baily gegebenen Form darstellt. An dem Arme KF hängt an einem feinen Seidenfaden EF ein sehr leichter horizontaler Stab e, an dessen Enden die kleinen Gewichte bb (in der Figur ist nur das rechte sichtbar) befestigt sind. Um einen derartig aufgehängten Stab in der horizontalen Ebene zu drehen, ist nur eine äußerst geringe Kraft erforderlich, da nur der Widerstand des sehr dünnen Seidenfadens gegen Drehung (Torsion) zu überwinden ist. Der Apparat führt deshalb den Namen *Drehwage* oder *Torsionspendel*. Die anziehenden, möglichst großen Massen bestehen aus zwei Bleikugeln WW, die auf einem drehbaren Tische T auf verschiedenen Seiten der leichten Kugeln b ruhen. Die Einwirkung

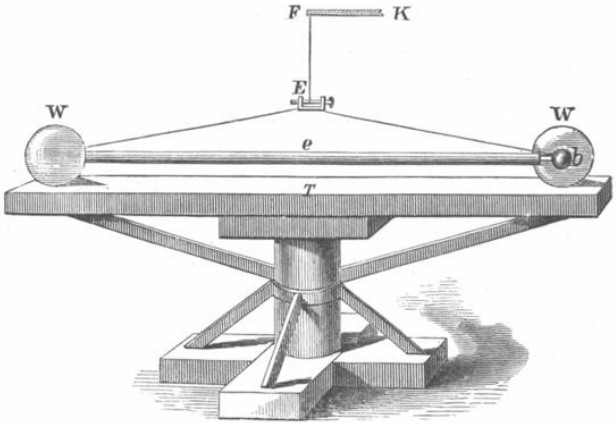


Fig. 23. Drehwage von Cavendish.

der schweren Bleikugeln auf bb versetzt nun die Drehwage aus der Gleichgewichtslage in Drehung (in der Figur in einer der Bewegung des Uhrzeigers entgegengesetzten Richtung), bis die Torsion des Seidenfadens die Weiterbewegung hindert, worauf die Wage nach kurzer Ruhe wieder nahezu in die anfängliche Lage zurückgeht. So macht sie mehrere Schwingungen, jede von einigen Minuten Dauer, und bleibt zuletzt in Ruhe in einer von der ersten verschiedenen Stellung. Die anziehenden Kugeln werden dann in die umgekehrte Stellung zu den angezogenen gebracht, so daß die Wage nun im Sinne des Uhrzeigers schwingt. Diese Schwingungen werden durch ein Mikroskop beobachtet und gemessen, welches in dem Kasten, der den ganzen Apparat umschließt, angebracht ist. Aus der Größe der Bewegungen kann dann die Anziehung der Kugeln berechnet werden. Cavendish erhielt so als mittlere Erddichte 5.45, wenn die mittlere Dichte des Wassers $= 1$ gesetzt wird.

Die Versuche sind später von anderen Beobachtern wiederholt worden. So fand Reich (1838) 5.49 und (1852) 5.58, Baily (1842) 5.67, Cornu und Baille (1872) 5.50, Boys (1894) 5.53 und Braun (1896) 5.53.

Dasselbe Problem hat man ferner dadurch zu lösen versucht, daß man die Attraktion von Bergen, also von Teilen der Erdkruste, zu bestimmen suchte. Der erste derartige Versuch, zugleich überhaupt der erste Versuch zur Bestimmung der Erddichte, rührt von dem englischen Astronomen Maskelyne her, welcher 1774 die Anziehung des Berges Shehallien in Schottland durch Beobachtung der Ablenkung des Lotes ermittelte. Das Prinzip der Messungen ist das folgende. Durch die Anziehung des Berges muß ein an seiner Seite aufgehängtes Bleilot aus der nach dem Mittelpunkte der Erde gerichteten oder vertikalen Lage nach dem Berge zu abgelenkt werden (Fig. 24). Kennen wir dann durch direkte Messung Dichtigkeit und Volumen des Berges, so läßt sich hieraus, in Verbindung mit der beobachteten Ablenkung und dem bekannten Volumen der Erde, die Dichte der letzteren bestimmen. Die auf diesem Wege abgeleitete Dichtigkeit der Erde war 4.95, also beträchtlich kleiner, als sie späterhin aus der Anziehung der Bleikugeln folgte. Diese Methode kann aber nur ungenaue Resultate geben, da man nicht imstande ist, die Verschiedenheiten der Dichte, die im Berge und in seiner Umgebung wohl meist vorhanden sein werden, in Rechnung zu ziehen. So fanden James und Clarke (1858) durch Beobachtungen am Berge Arthurs Seat bei Edinburgh den Wert 5.32.

Eine dritte Methode beruht auf der Bestimmung der Veränderung der Schwere. Die Wirkung der Gravitationskraft vermindert sich, je weiter wir von der Erde fort- oder in sie hineingehen. Diese Veränderung der Schwere bestimmt man nun am besten aus Pendelbeobachtungen. Die Anzahl der Schwingungen, die ein Pendel von gegebener Länge in einer gewissen Zeit macht, hängt nämlich wesentlich ab von der Schwerkraft; je stärker diese ist, desto rascher schwingt das Pendel. Zählt man nun die Schwingungen eines Pendels an einem Punkte der Erdoberfläche und an einem möglichst tief darunter gelegenen Punkte, so läßt sich aus der Veränderung der Schwingungszahl die Veränderung der Schwere und daraus dann die Dichte berechnen. Airy bestimmte auf diese Weise 1856 in einem Schachte des Kohlenbergwerkes Harton Colliery die Erddichtigkeit zu 6.56, und von Sterneck fand durch dasselbe Verfahren in vier Bergwerksschachten Werte zwischen 5 und 7.

Fig. 24.

Einen umgekehrten, im Prinzip aber ähnlichen Weg schlug 1824

Carlini ein, indem er die Pendelschwingungen am Fuße und auf der Spitze des Mont Cenis beobachtete. Aus der Vergleichung der beobachteten mit der theoretisch berechneten Änderung der Schwingungsdauer folgt, mit Berücksichtigung der Volumina von Erde und Berg und der Entfernung des Pendels vom Schwerpunkte beider, das Verhältnis der Dichtigkeit von Erde und Berg, also, wenn man letztere auf andere Weise ermittelt, die Erddichte selbst. Sie ergab sich zu 4.95. Mendenhall wiederholte (1885) den Versuch auf dem Berge Fujinoyama in Japan, und Preston (1894) bei zwei Bergen auf den Hawai-Inseln. Ersterer fand 5.77, letzterer 5.59. Dieses Verfahren kann jedoch ebensowenig als das von Airy auf große Genauigkeit Anspruch erheben, weil die in beiden Methoden nicht zu vermeidenden Hypothesen über die Dichtigkeit von Bestandteilen der Erde stets unsicher sein müssen.

Wesentlich genauer ist eine Methode, die Jolly vorschlug. Er versuchte das Problem mit Hilfe einer Wage zu lösen, indem er eine kleine Masse einmal unter dem Einflusse einer nahe befindlichen großen anziehenden Masse wog, das andere Mal ohne dieselbe. Jolly benutzte dabei eine Wage, welche an jedem Arme zwei Wagschalen trug, von denen die eine, die dem anziehenden Körper am nächsten war, 21 m unterhalb der oberen hing. Er erhielt so aus mehreren Versuchsreihen (1878 und 1881) den Wert 5.69. Poynting bediente sich desselben Prinzips, nur war bei seinen Versuchen die Anordnung eine andere. Er ersetzte die eine Schale seiner Wage durch eine kleine Bleikugel und maß die Anziehung, welche eine große Bleimasse auf diese Kugel ausübte. Poynting fand (1894) 5.49 für die mittlere Erddichte. Mit Hilfe einer der Jollyschen ähnlichen Doppelwage haben Richarz und Krigar-Menzel (1898) die Erddichte bestimmt. Ihr Verfahren bestand darin, daß sie zwei nahezu gleiche Kugeln miteinander verglichen, von denen sich zunächst die eine (A) auf dem ersten Arme oberhalb und die andere (B) auf dem zweiten Arme unterhalb einer 100000 kg schweren Bleimasse befand. Das Gewicht der Kugel A wurde bei dieser Anordnung durch die Anziehung der Bleimasse um ebensoviel vergrößert, als das der Kugel B verkleinert wurde; der Ausschlag der Wage entsprach somit dem doppelten Betrage der Anziehung. Wurde dann A in die untere Schale des ersten Armes, B in die obere Schale des zweiten Armes gelegt, so erzielte man den gleichen Ausschlag der Wage im entgegengesetzten Sinne. Für die Erddichte ergab sich aus diesen Versuchen der Wert 5.51.

In den Jahren 1887 und 1888 hat Wilsing eine wesentlich andere Methode zur Bestimmung der Erddichte in Anwendung gebracht. Der von ihm konstruierte Apparat bestand aus einem dünnwandigen Metallrohre,

an dessen Enden sich je eine Kugel aus Blei von 1 kg Gewicht befand. In der Mitte des Rohres war eine Schneide, die auf einem an einer Wand befestigten Lager ruhte, so angebracht, daß das Rohr sich pendelartig in einer auf der Schneide senkrechten Ebene gegen die Vertikale hin und her bewegen konnte. Es wurden nun der oberen und der unteren Kugel dieses zweiarmigen Pendels, das man auch als eine Wage mit vertikal stehendem Wagebalken bezeichnen könnte, mehrere Zentner schwere Metallmassen von verschiedenen Seiten her in der Ebene, in der die Pendelschwingungen erfolgten, genähert, so daß die obere Kugel durch die Massenanziehung nach rechts, die untere nach links und durch Umsetzung der Massen umgekehrt die obere Kugel nach links, die untere nach rechts abgelenkt wurde. Hierdurch wurden Ablenkungen des Pendels aus der Vertikallage hervorgebracht, deren Betrag viermal so groß war als der, den eine Masse auf eine der Kugeln am Ende des Pendels ausgeübt hätte Aus dem Gewichte der sich anziehenden Massen, der Ablenkung des Pendels und der Schwingungsdauer desselben berechnete Wilsing aus zwei zu verschiedenen Zeiten angestellten Versuchsreihen die Erddichte zu 5.58.

Wenn auch die einzelnen hier besprochenen Untersuchungen zum Teil sehr verschiedene Resultate geliefert haben, so läßt sich doch, namentlich aus den neueren und genaueren Bestimmungen, folgern, daß die mittlere Erddichte sehr nahe = 5.55 sein muß.

3. Figur und Größe der Erde.

Drehte sich die Erde nicht um eine Achse, so würde ihr die gegenseitige Anziehung aller ihrer Teile eine genau kugelförmige Gestalt zu geben streben; und wenn auch die Kohäsion der festen Teile die Herstellung einer vollkommenen Kugelform verhinderte, so würde doch wenigstens die Oberfläche des Meeres sehr nahe diese Gestalt annehmen. Setzen wir nun eine solche sphärische Erde in rotierende Bewegung um eine bestimmte Achse, so wird eine Zentrifugalkraft entstehen, welche die Teile von den Polen gegen die äquatorialen Gegenden hin zu bewegen sucht. Die Oberfläche wird dementsprechend die Form eines Sphäroids (eines Rotationsellipsoids) annehmen, dessen größter Durchmesser im Äquator, dessen kleinster in der Achse liegt. Eine Berechnung dieser Zentrifugalkraft aus den bekannten Größenverhältnissen der Erde und der Rotationszeit zeigt, daß dieselbe am Äquator $^1/_{289}$ der Schwerkraft beträgt. Sie vermindert also die Schwerkraft um diesen Betrag und ebenso das die Schwerkraft messende oder ausdrückende Gewicht eines Körpers.

Betrachten wir das Verhalten eines Pendels auf der Erdoberfläche, so finden wir, daß es am Äquator langsamer schwingt, oder daß eine Pendeluhr, die in nördlichen Breiten genau reguliert war, nachgeht. Diese Erfahrung machte in der Tat der französische Astronom Richer, der 1672 von der Pariser Akademie zur Anstellung von Marsbeobachtungen nach Cayenne gesandt worden war; er fand, daß seine in Paris genau richtig gehende Uhr in Cayenne täglich über 2^m nachging. Trotzdem glaubten die französischen Astronomen nicht an eine Abplattung der Erde, weil die in Frankreich unternommenen geodätischen Operationen eher eine Verlängerung der Erde in der Richtung der Pole als eine Abplattung anzuzeigen schienen. Dieses Resultat war aber dadurch hervorgerufen worden, daß wegen der Kürze der in Frankreich gemessenen Distanz die unvermeidlichen Beobachtungsfehler die Wirkung der Erdelliptizität vollständig verdeckten. Wir müssen indessen den französischen Astronomen der nächstfolgenden Generation nachrühmen, daß sie die sorgfältigsten Messungen anstellten, um die Frage endgültig zu entscheiden. Das durch Gradmessungen in Peru und Lappland von ihnen erhaltene Resultat war in vollkommener Übereinstimmung mit Newtons Theorie und gab ihr eine mittlerweile allerdings unnötig gewordene Bestätigung.

Newton war nicht imstande, die Figur, welche die Erde unter dem Einflusse ihrer eigenen Attraktion und der durch die Rotation hervorgerufenen Zentrifugalkraft hätte annehmen sollen, genau zu bestimmen, obschon er einsah, daß ihre Meridiane von Ellipsen nicht sehr abweichen könnten. Die Schwierigkeit des Problems rührt daher, daß, wie die Erde ihre Form infolge der Rotation ändert, sich Richtung und Stärke der Attraktion an den verschiedenen Punkten ihrer Oberfläche gleichfalls ändern, und daß dadurch von neuem eine Veränderung der Erdfigur bewirkt wird. Erst etwas später wurde das Problem, die Form einer rotierenden flüssigen Masse zu bestimmen, für einige Fälle gelöst; man fand, daß bei einem derartigen Körper die Meridiane Ellipsen sind und der Körper demnach ein Rotationsellipsoid ist.

Aus zwei Gründen weicht indessen die zu bestimmende Figur der Erde von einem genauen Ellipsoid ab. Der erste ist, daß die Dichtigkeit der Erde wächst, je mehr man sich dem Erdmittelpunkte nähert, der zweite, daß es große Unregelmäßigkeiten in der Dichte ihrer Oberflächenschichten gibt.

Für die wahre Figur der Erde ist durch Listing der Name *Geoid* eingeführt worden. Man definiert dasselbe als diejenige Fläche, welche die Richtung der Schwere überall senkrecht schneidet, also mit der Oberfläche der Meere im Mittel zusammenfällt. Ein mathematischer Ausdruck

für das Geoid als Ganzes, der die Beobachtungen innerhalb ihrer Genauigkeitsgrenzen darstellt, ist nicht angebbar.

Zur Bestimmung der Figur der Erde dienen in erster Linie die Gradmessungen, die in allen Kulturstaaten mit lebhaftem Eifer durchgeführt werden. Man hat bei einer Gradmessung zwei Operationen vorzunehmen: die eine, eigentlich geodätische, besteht in der Messung der Entfernung zweier Erdorte, die zweite, astronomische, in der Bestimmung des Winkelabstandes der Zenitpunkte dieser Orte. Wäre die Erde eine Kugel, so würde der Bogen auf der Erde zwischen den beiden Orten einfach durch den Abstand ihrer Zenitpunkte gemessen; die in einem bekannten Maße (Kilometer, Meile) ausgedrückte Entfernung gibt dann, in Verbindung mit dem Bogen, den Umfang oder auch den Durchmesser der Erde. Liegen die beiden Orte auf gleichem Meridian und beobachtet man an beiden die Höhe oder den Zenitabstand eines und desselben Gestirnes bei seinem Meridiandurchgange, so ergibt die Differenz dieser beiden Winkel unmittelbar den Breitenunterschied der Orte. Auf diese Weise, also durch eine Breitengradmessung, bestimmte schon Eratosthenes etwa 200 v. Chr. den Erdumfang zu 250000 Stadien oder 46250 km, wenn die Länge des Stadiums gleich 185 m angenommen wird.

Bei einem Rotationsellipsoid, wie es die Erde nahezu ist, verhält sich die Sache aber anders. Während bei der Kugel die Krümmung überall die gleiche ist, ändert sich dieselbe bei einem Ellipsoid; sie ist am stärksten am Äquator, am schwächsten an den Polen, wenn wir ebene Durchschnitte durch die Achse, also Ellipsen, betrachten. Die Polargegenden gehören gleichsam zu einer Kugel von größerem Durchmesser, als die Äquatorialgegenden. Man sieht danach leicht ein, daß z. B. einem Bogen von 1° an den Polen eine größere lineare Entfernung entsprechen muß, als am Äquator. Der Unterschied beider Größen bestimmt die Exzentrizität der Ellipse und damit die *Abplattung des Ellipsoids* oder die Differenz der beiden Achsen, in Teilen der großen Achse der Ellipse ausgedrückt. Die Messungen von Maupertuis in Lappland und von Bouguer und La Condamine in Peru (1735—1744), die ersten, welche mit genaueren Apparaten und in hinreichend verschiedener Breite vorgenommen wurden, ergaben nun die Länge eines Grades in Lappland zu 57438 Toisen, in Peru dagegen zu 56734 Toisen*), und hieraus folgte eine Erdabplattung von $^1/_{180}$. Die Frage war damit prinzipiell entschieden, und es handelte sich von nun an nur um eine genauere Bestimmung der Erddimensionen. Der größte Schritt geschah in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts, besonders durch Bessel, der durch die Verbindung seiner eigenen,

*) 1 Toise = 1.95 Meter.

im Verein mit Baeyer in Ostpreußen ausgeführten Gradmessung mit den genauesten von Frankreich, England usw. unternommenen Bestimmungen zu Resultaten gelangte, welche lange Zeit mit Recht als die sichersten gegolten und erst 1880 durch die von A. Clarke ermittelten Werte eine Verbesserung gefunden haben. Letzterer konnte eine größere Zahl von Gradmessungen, die in den vorhergehenden Jahrzehnten namentlich in Rußland und Ostindien ausgeführt worden waren, zur Ableitung der Erddimensionen benutzen, bediente sich aber wesentlich der von Bessel in die Wissenschaft eingeführten Untersuchungsmethoden. Die folgenden Zahlen geben die Resultate in Metern:

	Halbe große Achse	Halbe kleine Achse	Abplattung
Bessel (1841)	6377397	6356079	1 : 299.2
Clarke (1880)	6378249	6356515	1 : 293.5

Nach Clarke ist also die Erde etwas größer als nach Bessel und mehr abgeplattet. Indessen bleiben bei Bessel wie bei Clarke, wenn man aus den theoretischen Daten die Längen der Gradbogen zurückrechnet und mit den Beobachtungen vergleicht, noch Unterschiede übrig, die weit größer sind, als die Beobachtungsfehler zulassen. Diese Abweichungen sind auf die oben bereits erwähnten Unregelmäßigkeiten in der Massenlagerung der Erdrinde zurückzuführen, die nicht etwa nur bei Gebirgen, sondern auch in ganz ebenen Gegenden vorhanden sind (Lotablenkungen).

In den letzten Jahrzehnten haben nun die Methoden der Erdmessung eine wesentliche Erweiterung erfahren. Seit der Einführung des elektrischen Telegraphen besitzen die Längenbestimmungen eine solche Genauigkeit, daß neben den Breitengradmessungen auch Längengradmessungen mit der gleichen Sicherheit ausgeführt werden können. Ein anderes wichtiges Hilfsmittel zur Bestimmung der Erdgestalt ist das Pendel. Wir sahen bereits (S. 75), daß Pendel von gleicher Länge an verschiedenen Orten ungleich schwingen, langsamer am Äquator, schneller an den Polen. Dieses Verhalten findet zum Teil seine Erklärung in der nach dem Äquator hin anwachsenden Zentrifugalkraft, zum Teil aber in dem Umstande, daß die Erde keine Kugel ist, so daß sich die einzelnen Punkte der Erdoberfläche nicht in derselben Entfernung vom Erdmittelpunkte befinden, in welchem die Anziehung der Erde konzentriert zu denken ist. Wird daher mit Hilfe des Pendels an zahlreichen, passend verteilten Punkten der Erdoberfläche in bekannten Polhöhen die Schwerkraft bestimmt, so läßt sich daraus die mittlere Figur der Erde ermitteln. Helmert hat 1901 auf diese Weise aus den bis dahin ausgeführten Pendelbeobachtungen für die Abplattung der Erde den Wert 1 : 298.3 abgeleitet, und er konnte

später (1908), besonders nachdem Hecker die Schwere auch auf hoher See bestimmt hatte, zeigen, daß das Geoid ein abgeplattetes Rotationsellipsoid ist, mit kleinen wellenförmigen Abweichungen, die den Betrag von $\pm$ 100 m kaum einmal übersteigen, vielmehr meist nur wenige Zehner von Metern erreichen.

Alle diese Beobachtungen können jedoch nur dann zu entscheidenden Resultaten führen, wenn sie nach gemeinsamem Plane über möglichst große Teile der Erdoberfläche ausgedehnt werden. Es schlossen sich deshalb bereits im Jahre 1866 auf Baeyers Vorschlag die meisten Staaten Europas zur Europäischen Gradmessung zusammen, die wenige Jahrzehnte später durch Hinzutreten der wichtigsten außereuropäischen Kulturstaaten zur Internationalen Erdmessung erweitert wurde.

Die von dieser großartigen Organisation fast über die ganze Erde ausgedehnten Messungen haben in den letzten Jahren zu zwei neuen, sehr genauen Bestimmungen der Erddimensionen geführt. Es ergab sich für die halbe große Achse nach

Hayford (1909) 6378388 m
Helmert (1912) 6378192 m.

Die Abplattung fand Hayford dabei zu 1 : 297.0. Die Unterschiede zwischen beiden Bestimmungen rühren daher, daß diese auf Messungen in verschiedenen Gebieten der Erde beruhen, bei denen also die Abweichungen des Geoids von dem Rotationsellipsoid nicht die gleichen sind. Man wird aber annehmen dürfen, daß die Unsicherheit in dem Werte der halben großen Achse der Erde gegenwärtig nicht mehr größer als etwa 150 m ist.

4. Erklärung der Präzession.

Eine weitere rätselhafte Tatsache, welche durch die Gravitation vollkommen erklärt wurde, war die Präzession der Nachtgleichenpunkte. Wir beschrieben diese früher (S. 16) als eine langsame, stetige Änderung der Lage des Himmelspols unter den Sternen, die eine entsprechende Änderung in der Lage des Himmelsäquators zur Folge hat. Die Kopernikanische Lehre zeigt aber, daß die Himmelspole nur ein Bild der Erdpole sind, weil nicht der Himmel, sondern die Erde rotiert. Die Himmelspole geben einfach nur die bis zur Himmelskugel verlängerte Richtung der Erdachse an. Nach dem Kopernikanischen System muß demnach die Präzession in einer Veränderung der Richtung der Erdachse bestehen, infolge deren ihre Projektion am Himmel, die Pole, einen Kreis von $23^1/_2{}^\circ$ Halbmesser in etwa 26000 Jahren zu beschreiben scheinen. Newton erklärte nun diese

Erscheinung als eine Wirkung der Attraktion von Sonne und Mond auf das infolge der Zentrifugalkraft entstandene Erdellipsoid. Die Wirkung ist im wesentlichen dieselbe, als wenn die kugelförmige Erde längs des Äquators von einer ringförmigen Masse umgeben wäre. In Fig. 25 stelle AB diesen um die Sonne S laufenden Ring dar (von der innerhalb gelegenen Kugel der Erde sehen wir ab). Die aus der Bewegung der Erde um die Sonne entspringende Zentrifugalkraft wird dann der durchschnittlichen Anziehung der Sonne auf die Erde die Wage halten; am Punkte A aber, der näher an der Sonne ist, wird die Attraktion größer und die Zentrifugalkraft kleiner sein als bei C, so daß ein Kraftüberschuß den Punkt A nach der Sonne treiben wird. Umgekehrt ist bei B die Attraktion geringer als die durchschnittliche, und B wird daher von der Sonne wegstreben. Die Gesamtwirkung dieser Kraftunterschiede auf den gegen

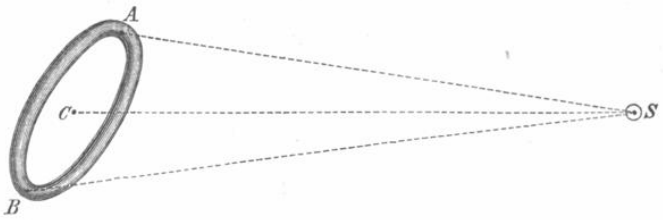


Fig. 25.

die Sonne geneigten Ring würde ihn um C zu drehen suchen, bis seine Ebene AB (also der Äquator) in die Richtung nach der Sonne CS fiele; und die im Ringe feste sphärische Erde würde langsam mitgedreht werden, die Richtung der Erdachse gegen die Sonne sich also gleichfalls stetig ändern. Dies wird nun aber durch die Rotation der Erde um ihre Achse verhindert, welche hier wie bei einem sich drehenden Kreisel wirkt, indem sie die Lage der Achse zu erhalten strebt (eine Folge des Trägheitsgesetzes). Anstatt einer Neigung der Achse gegen die Sonne entsteht so eine sehr langsame drehende Bewegung, welche sich uns am Himmel eben als Präzession darstellt. Die Natur dieser Bewegung kann auch aus Fig. 19 (S. 54) ersehen werden. Der Nordpol N ist hier nach rechts geneigt, so daß den Positionen A und C die Solstitien, B und D die Äquinoktien entsprechen. Die Wirkung der Attraktion von Sonne und Mond auf die sphäroidische Erde (oder genauer auf die wulst- oder ringförmige äquatoriale Erhebung) ist die, daß nach 6500 Jahren der Nordpol oder die Achse dem Beschauer der Figur unter dem gleichen Winkel von etwa $23^1/_2{}^0$ zugekehrt sein wird, die Solstitien also in B und D, die Äquinoktien in A und C liegen werden. Nach weiteren 6500 Jahren wäre Achse und

Nordpol nach links, statt nach rechts, geneigt, nach abermals 6500 Jahren vom Beobachter weg (hinter die Ebene des Papieres) und endlich am Schlusse der vierten Periode wieder wie in der jetzigen Lage.

Die eben beschriebenen Erscheinungen würden nicht eintreten, wenn die Ebene des Ringes AB (Fig. 25) durch die Sonne ginge, wenn also keine Neigung des Erdäquators gegen die Erdbahn existierte, weil dann die Kräfte, welche A zur Sonne hin und B von ihr wegziehen, direkt gegeneinander wirken und sich so, bezüglich der Drehung, aufheben würden. Zeitweise findet dies nun wirklich statt, und zwar in den Äquinoktialpunkten, wenn die Sonne also den Äquator passiert. Die Präzessionsbewegung ist daher nicht gleichförmig, sondern veränderlich: beträchtlich größer als der mittlere Wert im Juni und Dezember, wo die Deklination der Sonne am größten ist, und geringer im März und September, wo die Sonne in der Ebene des Äquators steht. Überdies ist im Dezember die Erde der Sonne näher als im Juni und die Attraktion also dann größer; wir erhalten aus diesem Grunde noch eine andere Ungleichheit.

Die Präzession wird nicht allein durch die Sonne hervorgerufen, vielmehr ist die Wirkung des Mondes noch bedeutender, da seine geringere Masse durch größere Nähe mehr als ausgeglichen wird. Die Kraft nämlich, die in Verbindung mit der Erdrotation die Präzession hervorbringt, ist proportional der Differenz der beiden Anziehungen auf A und B (Fig. 25), und diese Differenz ist bei der Attraktion des Mondes infolge der geringeren Entfernung größer. Durch das gemeinsame Einwirken von Sonne und Mond verwickeln sich die Erscheinungen der Präzession erheblich. Dieselben Ursachen, welche die Wirkung der Sonne veränderlich machen, verändern auch die des Mondes, und wir haben überdies bei letzterem noch zu berücksichtigen, daß infolge der Bewegung der Mondknoten die Neigung der Mondbahn gegen den Erdäquator einer Schwankung unterworfen ist, deren Periode 18.7 Jahre beträgt, und die eine Ungleichheit von gleicher Periode in der Präzession bedingt. Diese verschiedenen periodischen Ungleichheiten in der Präzession faßt man unter dem Namen »*Nutation* oder Schwankung der Erdachse« zusammen. Sie sind jetzt alle genau berechnet und in den astronomischen Tafeln niedergelegt.

5. Ebbe und Flut.

Seefahrenden Nationen des Altertums schon war es bekannt, daß eine eigentümliche Beziehung zwischen den Erscheinungen der Ebbe und Flut und der täglichen Bewegung des Mondes besteht. Cäsars Schilderung seiner Fahrten durch den Kanal lehrt, daß er das Gesetzmäßige des Phänomens

kannte. Bei der Beschreibung der Mondbewegung wurde gezeigt (S. 18), daß der Mond infolge seiner Bahnbewegung um die Erde täglich etwa drei Viertelstunden später aufgeht, den Meridian passiert und untergeht. Die »*Gezeiten*« (*tides* der Engländer) treten zweimal täglich ein, aber jeden Tag um etwa den Betrag der Mondverzögerung später. Hiernach treffen die Gezeiten für einen gegebenen Erdort jedesmal wieder ein, wenn der Mond nahe an demselben Punkte seines scheinbaren täglichen Laufes ist.

Die Ursache dieser Erscheinung und ihre Beziehung zum Monde war dunkel, bis die Gravitationstheorie lehrte, daß sie von der Anziehung des Mondes auf die Gewässer des Ozeans herrührt. Der Grund, warum Ebbe und Flut eintreten, und zwar zweimal am Tage, wird bei Betrachtung der

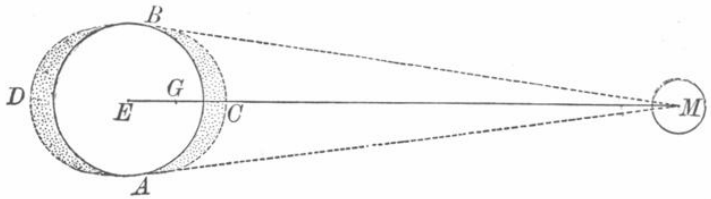


Fig. 26. Anziehung des Mondes auf die flüssige Erde.

Bahnbewegung des Mondes um die Erde ersichtlich. In Fig. 26 sei M der Mond, E der Mittelpunkt der Erde. Die dem Monde zugewandte Seite der Erdoberfläche wird nun von ihm stärker angezogen als der Mittelpunkt, die dort gelegenen flüssigen Teile werden also nach C hingezogen. Der Mittelpunkt E wiederum wird stärker angezogen als die vom Monde abgekehrte Seite; flüssige Teile werden sich also hier nach D erheben. Zu gleicher Zeit findet demnach an einem Erdort und dem diametral gegenüberliegenden Flut, an den zwischen beiden liegenden Punkten (A und B) Ebbe statt. Ein Punkt G der Erde rotiert relativ zum Mond in etwa $24^{3}/_{4}{}^{h}$ um den Mittelpunkt E; es treten also für ihn in dieser Zeit die durch $CBDA$ angedeuteten Phasen ein, zweimal Flut und zweimal Ebbe. Da der Mond sich nicht sehr weit vom Äquator entfernt, werden auch Flut und Ebbe in den Äquatorialgegenden der Erde im allgemeinen am stärksten sein und sich gegen die Pole hin allmählich verlieren, sofern nicht die lokalen Einflüsse durch die Gestaltung der Kontinente und Inseln Abweichungen vom regelmäßigen Verlaufe erzeugen.

Gehorchte das Wasser sofort der Anziehungskraft des Mondes, so würde stets Flut sein, wenn der Mond den Meridian (in der oberen oder unteren Kulmination) passiert, und stets Ebbe, wenn er auf- oder untergeht. Aber wegen der Trägheit muß eine gewisse Zeit vergehen, bis die immerhin sehr geringe Kraft das Wasser in Bewegung zu setzen

vermag, und einmal in Bewegung, bleibt es auch noch einige Zeit darin, nachdem die Kraft aufgehört und entgegengesetzt zu wirken begonnen hat. Wäre die Bewegung des Wassers durch nichts behindert, so würde demnach Hochwasser einige Stunden nach dem Meridiandurchgange des Mondes stattfinden. Indessen stören die Kontinente und die Inseln die freie Bewegung des Wassers, und zwar beeinflußen sie die Flutwelle in solchem Maße, daß dieselbe in manchen Fällen viele Stunden, ja selbst einen ganzen Tag später eintritt. Mitunter treffen zwei Wellen gleicher Phase zusammen und bewirken auf diese Art ein ungewöhnlich starkes Hochwasser, oder sie haben eine lange Bai hinaufzugehen und erzeugen das Hochwasser alsdann durch die eintretende Stauung; an einzelnen Orten (z. B. in der Fundybai an der Ostküste der Vereinigten Staaten) treffen beide Ursachen zusammen und lassen so das Hochwasser bis zu 20 m und darüber anwachsen.

Aus dem gleichen Grunde wie der Mond bringt auch die Sonne eine Flut hervor; wegen der weit größeren Entfernung der Sonne ist die Wirkung indessen geringer, nämlich nur vier Zehntel von der des Mondes. Zur Zeit des Neu- und des Vollmondes vereinigen sich die Anziehungen beider Körper, da sie alsdann in derselben Richtung auf die Erde wirken, und Ebbe und Flut sind zu diesen Zeiten beträchtlicher als im Durchschnitt; wir haben dann die sogenannten Springfluten. Ist andererseits der Mond im ersten oder im letzten Viertel, so üben beide Körper entgegengesetzte Wirkung aus; Ebbe und Flut sind also kleiner als im Durchschnitt (Nippfluten).

6. Die Störungen.

Die Abweichungen von den Keplerschen Gesetzen, welche der Lauf eines Körpers unseres Sonnensystems, eines Planeten, Kometen oder Mondes, speziell unseres Mondes, infolge der gleichzeitigen Anziehung der übrigen Körper zeigt, begreift man im allgemeinen unter dem Namen der *Störungen*; und das schwierigste Problem und die wichtigste aus der Theorie der Gravitation erwachsende Frage ist, ob alle diese Störungen in der Bewegung der Planeten, Kometen und Monde aus ihrer gegenseitigen Anziehung berechnet werden können. Vollständig läßt sich diese Frage nur beantworten durch Ausführung der Rechnung und durch die Prüfung, ob die daraus resultierende Bewegung vollkommen mit der beobachteten übereinstimmt. Indessen ist schon das Problem, die Bewegung eines Planeten um die Sonne unter dem fortwährenden Einfluß der Anziehung eines anderen zu berechnen — das sogenannte *Problem*

der drei Körper — so verwickelt, daß eine vollständige und strenge Lösung bisher nicht gefunden worden ist. In seiner allgemeinsten Form läßt sich das Störungsproblem so aussprechen: Eine beliebige Zahl von Körpern mit bekannter Masse (Planeten) ist im Raume zerstreut, und ihre Örter, Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen sind für einen bestimmten Moment gegeben. Sie seien dann ihrer gegenseitigen Anziehung nach dem Gravitationsgesetz überlassen. Es wird verlangt, allgemeine Formeln zu finden, durch welche ihre Örter zu jeder beliebigen Zeit bestimmt werden können. In dieser allgemeinen Form ist nicht einmal eine Näherung zu einer vollständigen Lösung gefunden worden. Aber der Umstand, daß die Bahnen, welche die Planeten um die Sonne, die Satelliten um ihre Hauptkörper beschreiben, nahe kreisförmig sind, ermöglicht es, den Ort so genau, als wir wollen, zu berechnen.

Die Schwierigkeit des Problems ist eine Folge davon, daß die auf die Planeten wirkenden Kräfte von deren Bewegungen abhängen, und daß diese wiederum durch die Kräfte bestimmt werden, welche auf die Körper wirken. Zögen sich die Planeten überhaupt nicht gegenseitig an, so könnte das Problem vollständig gelöst werden, weil sie sich dann sämtlich, in genauer Übereinstimmung mit Keplers Gesetzen, in Ellipsen bewegen würden. Setzte man aber elliptische Bewegung voraus, so könnten die Örter der Planeten jederzeit durch einfache Formeln ausgedrückt werden und auf gleiche Weise die gegenseitigen Anziehungen. Aber gerade wegen dieser Anziehungen bewegen sie sich nicht in Ellipsen, und die so gefundenen Formeln werden daher nicht korrekt sein. Man kann die Bewegung eines Planeten eigentlich nicht eher berechnen, als bis man die Anziehungen aller anderen Planeten auf ihn kennt, und man kann umgekehrt diese nicht bestimmen, ohne zuvor die Position des Planeten zu kennen, das heißt also eigentlich, ohne das Problem schon gelöst zu haben.

Die Frage, wie diese Schwierigkeiten zu überwinden sind, hat viele große Mathematiker seit Newtons Zeit beschäftigt; und obschon vollständiger Erfolg ihre Anstrengungen nicht belohnt hat, so zeigt doch die große Genauigkeit, mit welcher sich die berechneten Bahnen von Sonne, Mond und Planeten den wahren Bahnen anschließen, und die Sicherheit, mit der die Gesetze der Änderung dieser Bahnen für vergangene und kommende Jahrhunderte festgelegt sind, daß ihre Arbeit nicht vergeblich gewesen ist. Newton konnte das Problem nur auf geometrischem Wege angreifen; er zeigte, wie die Kräfte in einzelnen Teilen der Bahnen zweier Planeten wirken, von denen einer durch den anderen gestört wird. Er vermochte so darzulegen, wie die Anziehung der Sonne auf den Mond die Bahn des letzteren um die Erde ändert und die Wanderung der Mond-

knoten verursacht, und konnte genähert schon eine oder zwei Ungleichheiten in der Bahnbewegung des Mondes berechnen.

Als die Mathematiker des Festlandes von der Richtigkeit der Newtonschen Theorie vollkommen überzeugt waren, ergriffen sie das Problem der planetarischen Bewegung mit einer Energie und Einsicht, die bald von schönstem Erfolge gekrönt wurde. Sie erkannten das durchaus Ungenügende der geometrischen Methode Newtons und die Notwendigkeit, die Kräfte, welche die Planeten bewegen, auf analytischem Wege auszudrücken, und waren durch Anwendung dieser analytischen Methode imstande, Newtons und seiner Landsleute Arbeiten weit zu überholen. Die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts wurde auf diese Weise das goldene Zeitalter der theoretischen Astronomie. Vor allen glänzen hier die Namen eines Clairaut, d'Alembert, Euler, Lagrange und Laplace. Die großen Werke, welche dieses Jahrhundert beschlossen, Laplaces »Mécanique céleste« und Lagranges »Mécanique analytique«, enthalten alles, was damals über diesen verwickelten Gegenstand bekannt war, und bildeten die Basis beinahe von allem, was seitdem vollendet worden ist. Wir wollen kurz einige Resultate aus den Werken von Laplace, Lagrange und ihren Nachfolgern anführen.

Vielleicht das überraschendste dieser Ergebnisse ist das Phänomen der langsamen Änderungen oder sogenannten *säkularen Störungen* der Planetenbahnen. Kopernikus und Kepler hatten aus der Vergleichung der Planetenbahnen nach den Beobachtungen ihrer Zeit mit denen des Ptolemäus gefunden, daß Form und Lage dieser Bahnen langsamen Änderungen unterworfen sind. Die unmittelbaren Nachfolger Newtons vermochten diese Änderungen auf die gegenseitige Einwirkung der Planeten zurückzuführen, und so erhob sich nun die wichtige Frage, ob sie für alle Zeit fortdauern werden. Denn geschähe das, so würde eine gänzliche Umgestaltung oder Verwirrung des Sonnensystems und damit die Vernichtung alles Lebens auf unserer Erde die unausbleibliche Folge sein. Die Bahnen der Erde und der anderen Planeten würden so exzentrisch werden, daß bei der großen Annäherung an die Sonne zu einer Zeit und der außerordentlichen Entfernung zu einer anderen die Temperaturunterschiede unerträglich werden würden. Lagrange bewies nun, daß diese Änderungen die Folge eines Systems regelmäßiger und periodischer Schwankungen sind, welches sich über das ganze Planetensystem ausdehnt, und daß die Perioden der Schwankungen von so außerordentlich langer Dauer sind, daß selbst während der Jahrtausende, in denen Menschen die Planeten beobachtet haben, nur eine progressive Bewegung merkbar sein kann. Die Zahl dieser kombinierten Oszillationen ist gleich der Zahl der Planeten, und ihre Perioden laufen von 50000 bis zu 2000000 Jahren — »große

Uhren der Unendlichkeit, die Zeitalter schlagen, wie die unsrigen Sekunden«. Infolge dieser Schwankungen bewegen sich die Perihelien die ganze Bahn entlang, und die Exzentrizitäten ändern sich, aber nur innerhalb ziemlich enger Grenzen. Ist so die Stabilität des Planetensystems auch für sehr lange Zeiten gesichert, so gilt, wie die Untersuchungen neuerer Theoretiker gezeigt haben, jene Beweisführung doch nicht für unbegrenzte Zeiträume, und wir sind daher durchaus nicht imstande, zu sagen, was dereinst aus unserem Planetensystem werden wird.

Mit der Bewegung des Mondes, welche bei der Nähe unseres Trabanten störende Einflüsse noch wahrnehmen läßt, die sich bei anderen, entfernteren Körpern der Beobachtung entziehen, haben sich seit der Entwicklung der Analyse die bedeutendsten Mathematiker mit Vorliebe beschäftigt, und manche der mit ihnen verbundenen Fragen sind auch heutigen Tages noch nicht vollständig gelöst. Die wichtigste betrifft die *Akzeleration* der Bewegung. Halley hatte zu Anfang des 18. Jahrhunderts aus der Vergleichung alter Finsternisse mit neueren Beobachtungen eine säkulare Beschleunigung der Mondbewegung gefunden. Für Lagrange und Laplace, die dies vollauf bestätigten, war diese Tatsache sehr überraschend, da sie streng bewiesen zu haben glaubten, daß die gegenseitigen Anziehungen der Planeten oder Satelliten niemals deren mittlere Bahnbewegungen dauernd beschleunigen oder verzögern könnten; es schien also die Mondbewegung noch von einer anderen Kraft als der Gravitation beeinflußt zu sein. Nach mehrfachen vergeblichen Versuchen fand Laplace, daß infolge der säkularen Verringerung der Exzentrizität der Erdbahn die Wirkung der Sonne auf den Mond in der Tat eine fortschreitend veränderliche ist und eine Beschleunigung seiner Bewegung von 10″ im Jahrhundert hervorbringt, und zwar mußte die Wirkung dem Quadrate der Zeit proportional sein; wäre also der Mond nach einem Jahrhundert um 10″ voraus, so würde er nach zwei Jahrhunderten 40″, nach drei Jahrhunderten 90″ usw. dem berechneten Orte vorausgeeilt sein.

Dieses Resultat stimmte mit der beobachteten Akzeleration, d. h. der aus der Vergleichung alter Finsternisse mit modernen Beobachtungen gefundenen, so gut überein, daß bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts niemand an seiner Richtigkeit zweifelte. Da ermittelte Adams, der die Laplaceschen Rechnungen aufgenommen und weiter durchgeführt hatte, daß die fragliche Wirkung nicht 10, sondern nur 6 Sekunden beträgt. Gleichzeitig schien aber eine genauere Prüfung alter und neuer Beobachtungen zu zeigen, daß aus ihnen umgekehrt eine größere Akzeleration, nämlich 12 Sekunden statt 10, folge, also das Doppelte von der nach der Gravitationstheorie durch Adams berechneten. Die Untersuchungen von Newcomb haben

allerdings den Betrag der beobachteten Akzeleration wieder auf 8.″0 reduziert.

Das von Adams gefundene Resultat veranlaßte die lebhaftesten Diskussionen. Während Hansen, Plana und Pontécoulant dasselbe bestritten und ersterer durch eine wesentlich von der Adamsschen verschiedene Methode sogar einen noch größeren Wert als Laplace fand, nämlich 12″, stimmte andererseits Delaunay, der das Problem gleichfalls auf anderem Wege behandelte, mit Adams im Endresultat überein. Je eingehender nun weiterhin die Frage untersucht wurde, desto mehr neigte sich die Wage auf Adams Seite. Er selbst zeigte, daß die Methoden von Pontécoulant und Plana mißlich seien, Cayley berechnete die Akzeleration auf einem neuen Wege, und Delaunay untersuchte die Sache gleichfalls von neuem, und beide fanden wieder dasselbe wie Adams. Nachdem nun noch neuerdings Brown durch eine sehr sorgfältige Rechnung 6.″0 gefunden hat, kann die Frage von der theoretischen Seite aus als entschieden betrachtet werden.

Halten wir uns also an dieses letzte Ergebnis, so besteht eine Differenz zwischen der berechneten und der beobachteten Akzeleration, deren Ursache ergründet werden muß. Eine mögliche Ursache bietet sich in der Flutwelle des Ozeans, deren Reibung die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde um ihre Achse fortwährend zu verringern strebt. Die Folge davon muß eine allmähliche, sehr langsame Zunahme der Länge eines Tages oder unserer Zeiteinheit sein, und die Zählung der Zeit wird sich daher stetig verzögern. Der Mond würde scheinbar schneller gehen, während in Wirklichkeit die Erde langsamer rotierte. Der Betrag dieser Verzögerung, der notwendig wäre, um den Überschuß der beobachteten Akzeleration (nach Newcomb) über die berechnete zu erklären, ist etwa 3^s im Jahrhundert; das heißt, wir müßten annehmen, daß die Zählung unserer Zeit nach 100 Jahren um 3^s hinter derjenigen zurückbleibt, die wir mit der jetzt gültigen Rotationsdauer gleichmäßig fortzählend erhielten. Diese Veränderung ist indessen so geringfügig, daß wir sie auch heute noch nicht mit voller Sicherheit aus der Beobachtung nachweisen können.

Die säkulare Akzeleration ist nicht die einzige Veränderung oder Störung, welche die mittlere Bewegung des Mondes erleidet, ohne daß die Gravitationstheorie dafür eine Erklärung liefert. Es ist vielmehr noch eine unerklärte Schwankung in der Länge des Mondes vorhanden, welche nach Newcomb eine Periode von ungefähr 270 Jahren zu haben scheint. Infolge dieser Störung entfernt sich der Mond um etwa 13″ nach beiden Seiten von der Stellung, welche aus der Rechnung folgt, wenn man die Anziehung der übrigen Körper des Sonnensystems und die säkulare Akzeleration berücksichtigt. Über diese 270jährige Welle in der Bewegung des

Mondes lagern sich noch kleine, ebenfalls unerklärte Unregelmäßigkeiten von etwa 6″ Gesamtamplitude und ungefähr 18 Jahren Periode. Mancherlei Hypothesen sind aufgestellt worden, um alle diese Störungen zu erklären, aber keine von ihnen kann völlig befriedigend genannt werden. Am interessantesten von diesen Erklärungsversuchen ist vielleicht ein von Bottlinger auf Anregung von Seeliger unternommener, welcher sich auf die zuletzt erwähnten Schwankungen von 6″ Amplitude bezieht. Bottlinger geht von der Anschauung aus, daß vielleicht die von der Sonne auf den Mond ausgeübte Anziehung eine Abschwächung erleiden könnte, wenn die Erde zwischen Sonne und Mond tritt, d. h. also während der Mondfinsternisse. Die Erde würde nach dieser Ansicht also eine Absorption auf die Gravitation ausüben. Es ergaben sich unter dieser Annahme tatsächlich Störungen der Mondbewegung, die eine gewisse Parallelität mit der oben erwähnten kleinen, wirklich beobachteten Schwankung zeigen. Aber diese Parallelität ist doch nicht so weitgehend, daß man von der Richtigkeit der Hypothese völlig überzeugt würde. Die Absorption der Gravitation durch die Erde würde übrigens nach Bottlinger für einen die Erde diametral durchsetzenden Gravitationsstrahl nur $\frac{1}{60000}$ betragen.

Eine andere, noch nicht vollständig durch die Anziehung der übrigen Planeten erklärte Veränderung treffen wir in der Bewegung des Merkur. Leverrier hat gezeigt, daß die Perihelbewegung dieses Planeten etwa 40″ im Jahrhundert größer ist, als sie nach der Anziehung aller in Betracht kommenden Körper sein sollte. Er schreibt dies der Wirkung einer Gruppe sehr kleiner Planeten zwischen Merkur und Sonne zu, deren Bahnebene mit der des Merkur nahe zusammenfalle. Die Existenz intramerkurieller Planeten ist aber sehr unwahrscheinlich, da weder bei den äußerst zahlreichen Beobachtungen der Sonnenscheibe, noch bei den während totaler Sonnenfinsternisse speziell nach solchen Planeten angestellten Nachforschungen derartige Körper gefunden worden sind. Neuerdings hat nun Seeliger gezeigt, daß die Anziehung der die Sonne umhüllenden Staubwolke, welche man Zodiakallicht nennt, nicht nur die Bewegung des Merkurperihels verursachen kann, sondern auch bisher noch nicht erklärte unbedeutende Störungen der Bewegung des Marsperihels und des Knotens der Venus. Die Dichtigkeit der Massenverteilung im Zodiakallicht, selbst in den der Sonne am nächsten liegenden Partien, würde nur als so groß angenommen werden müssen, wie wenn man einen Würfel Wasser von weniger als $^1/_3$ Meter Seitenlänge in einen Raum von 1 Kubikkilometer verteilt.

Mit Ausnahme der genannten Fälle, zu denen noch gewisse, später näher zu besprechende Störungen des Enckeschen Kometen kommen,

stimmen alle Bewegungen im Sonnensystem mit den Resultaten der Gravitationstheorie überein. Die kleinen Unvollkommenheiten, welche in den astronomischen Tafeln noch bestehen, scheinen hauptsächlich aus Fehlern in den Daten hervorzugehen, von denen der Mathematiker bei der Berechnung der Bewegung eines jeden Planeten ausgehen muß. Weder die Umlaufszeit eines Planeten, noch die Exzentrizität seiner Bahn, die Lage des Perihels oder der Ort in der Bahn zu einer gegebenen Zeit kann aus der Gravitationstheorie berechnet, sondern muß aus den Beobachtungen abgeleitet werden. Wären die Beobachtungen fehlerfrei, so könnten Resultate von jedem gewünschten Genauigkeitsgrade aus ihnen erhalten werden; aber die Unvollkommenheiten aller Instrumente und des menschlichen Auges selbst verhindern, daß die Beobachtungen den Grad der Genauigkeit erreichen, den der Theoretiker verlangt, und sie machen fortdauernd Betrachtungen über die »Beobachtungsfehler« wie über die »Tafelfehler« notwendig.

7. Bahnbestimmung.

So schwierig die Aufgabe ist, der die vorausgehenden Betrachtungen galten, die Bahn eines Planeten mit Rücksicht auf alle Störungen durch andere Planeten zu berechnen und seinen Lauf für Jahrhunderte vorwärts und rückwärts zu verfolgen, so findet sie doch eine gewisse Erleichterung darin, daß die Bahnen der Himmelskörper, die man einem so eingehenden Studium unterwirft, immer bereits nahe bekannt sind, so daß der spätere Berechner jedes Mal nur die Arbeit des früheren auf eine höhere Stufe der Vollkommenheit zu bringen hat. Aber es gibt noch ein anderes Problem der »Bahnbestimmung«, das im Prinzip viel einfacher ist, dessen Schwierigkeit aber darin liegt, daß es plötzlich an den Astronomen herantritt und ohne solche Vorarbeiten gelöst werden muß. Sobald nämlich ein neuer Planet oder Komet entdeckt ist, soll aus den ersten Beobachtungen des Himmelskörpers sofort seine Bahn wenigstens mit solcher Schärfe abgeleitet werden, daß der neue Fund leicht weiter verfolgt und gesichert werden kann. An diese Aufgabe denkt der Astronom zunächst, wenn er von »Bahnbestimmung« spricht, und es soll hier versucht werden, die Natur dieses Problems klar zu machen, ohne daß wir dem rechnenden Astronomen ganz bis in seine von mathematischem Rüstzeug starrende Werkstatt folgen wollen.

Die wesentlichste Vereinfachung, die man sich bei dem Problem der raschen Bahnbestimmung eines neuentdeckten Himmelskörpers erlaubt, ist die, daß man von allen Störungen durch die Planeten absieht und voraussetzt, daß er allein der Anziehung der Sonne folgt. Dann gelten

für seine Bewegung die Keplerschen Gesetze in ihrer durch Newton erweiterten Form.

Das erste Keplersche Gesetz sagt aus, daß sich der Himmelskörper in einem Kegelschnitt bewegt, in dessen einem Brennpunkt die Sonne steht. Bei den Planeten ist der Kegelschnitt eine Ellipse, bei den Kometen auch eine Parabel oder eine Hyperbel. Die Kegelschnitte hängen in folgender Weise zusammen.

Wird durch einen geraden Kreiskegel eine Ebene so gelegt, daß sie den Kegelmantel überall schneidet, so entsteht eine Ellipse (*EE* Fig. 27).

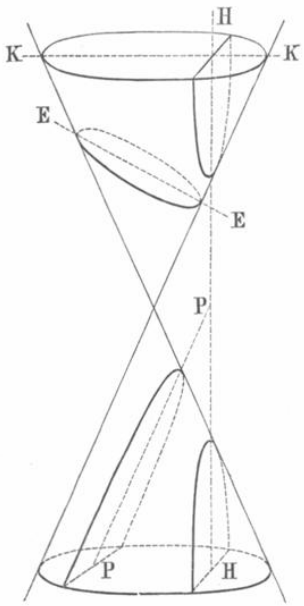


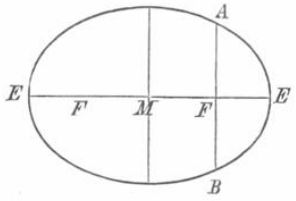
Fig. 27.

Die Größe der Ellipse ändert sich mit der Neigung der Schnittebene gegen die Kegelachse. Sie ist für eine gegebene Entfernung von der Spitze des Kegels am kleinsten, und die Ellipse wird zum Kreise (*KK*), wenn die Ebene senkrecht auf der Achse steht; sie wächst, wenn der Neigungswinkel abnimmt. Läßt man nun die Neigung gegen die Achse immer geringer werden, so wird die Schnittebene schließlich einer Seite des Kegels parallel. In diesem Falle haben wir eine Parabel (*PP*). Wird die Neigung noch geringer, so entsteht eine Hyperbel (*HH*), welche, wie man aus der Figur ersieht, aus zwei getrennten Zweigen besteht. In dem in der Figur dargestellten speziellen Fall, wo die Schnittebene der Kegelachse parallel ist, hat man die gleichseitige Hyperbel. Die Ellipse ist eine geschlossene Figur und der Kreis ein spezieller Fall von ihr; Parabel und Hyperbel dagegen sind nicht geschlossene Kurven, sondern haben Arme, die sich in die Unendlichkeit erstrecken (Fig. 28).

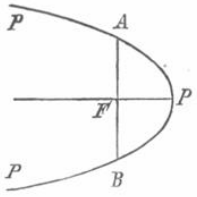
Wenn man sich hiernach alle möglichen Kegelschnitte vorstellt, so unterscheiden sich dieselben in zweierlei Hinsicht, erstens durch ihre Form, zweitens durch ihre Größe. Die Form eines Kegelschnitts bezeichnet man am besten, indem man seine Exzentrizität angibt, seine Größe charakterisiert man durch den sogenannten Parameter.

Die *Exzentrixität* (e) der Ellipse ist das Verhältnis des Abstandes FM eines Brennpunktes (F) vom Mittelpunkte (M) zum halben größten Durchmesser oder zur halben großen Achse ($a = ME$, also $e = \frac{FM}{a}$), der *Parameter* ($2p$) die durch den Brennpunkt gehende Senkrechte AB. Der Brenn-

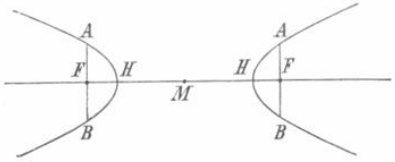
punkt F entspricht dem Durchschnittspunkte der Kegelachse. Im Kreise fallen Brennpunkt und Mittelpunkt zusammen, die Exzentrizität verschwindet, und der Parameter wird gleich dem Durchmesser des Kreises. In der Parabel, deren Achse unendlich groß ist, und deren Mittelpunkt daher gleichsam auch in unendlicher Entfernung vom Brennpunkte liegt, ist die Exzentrizität gleich eins; in der Hyperbel ist sie größer als eins. Ellipse und Hyperbel haben zwei Brennpunkte, die Parabel hat einen. Die Ellipse hat die Eigenschaft, daß die Summe der zu jedem Punkte gehörigen beiden Radii Vectores gleich der großen Achse ist; dies gibt für sie ein bequemes Konstruktionsmittel.



Ellipse.



Parabel.



Hyperbel.

Fig. 28.

Wenn man nun die Bahn eines Himmelskörpers bezeichnen will, so hat man zunächst Exzentrizität und Parameter des Kegelschnitts, welchen er beschreibt, anzugeben. Man hat ferner die Lage des Kegelschnitts im Raum zu fixieren. Der eine Brennpunkt liegt freilich fest in der Sonne, aber es kommen Kegelschnitte in allen möglichen durch die Sonne gehenden Ebenen in Betracht. Die Ebenen der Planetenbahnen liegen zwar mehr oder weniger nahe der Ebene der Erdbahn, der Ekliptik, aber die Kometen laufen zum Teil in Ebenen, die fast senkrecht zur Ebene der Erdbahn stehen. Man fixiert jede Bahnebene, indem man ihre *Neigung* gegen die Erdbahn angibt und die *Länge des aufsteigenden Knotens*, d. h. den Winkelabstand desselben vom Frühlingspunkte. Schließlich hat man noch festzustellen, wie der Bahnkegelschnitt innerhalb der Bahnebene orientiert ist. Das geschieht am einfachsten, indem man den Winkel zwischen der großen Achse der Bahn und der Knotenlinie angibt. Man wählt dabei dasjenige

Ende der großen Achse, welches der Sonnennähe, dem Perihel, entspricht, und bezeichnet den Winkel als *Abstand des Perihels vom Knoten.*

Es sind also, um die Bahn eines Himmelskörpers zu fixieren, im ganzen fünf *Elemente* anzugeben: Exzentrizität, Parameter, Knotenlänge, Neigung, Abstand des Perihels vom Knoten.

Es erübrigt nur noch, die Mittel namhaft zu machen, mit denen man nun auch noch für jeden Himmelskörper den Punkt seiner Bahn festlegt, an dem er sich zu einer beliebigen Zeit befindet. Dazu muß man zunächst einmal angeben, an welchem Punkt sich der Himmelskörper zu einer bestimmten Zeit befand. Man pflegt hierfür die Zeit des Perihels zu wählen, gibt also an, zu welcher Zeit der Körper in der Sonnennähe stand. Mit dieser *Perihelzeit* als sechstem Element sind alle notwendigen Angaben beisammen. Denn die späteren Stellungen des Himmelskörpers folgen aus dieser Anfangsstellung mit Hilfe des zweiten und dritten Keplerschen Gesetzes, welche man in die Aussage zusammenfassen kann: Die in der Zeiteinheit vom Radiusvektor überstrichene Fläche ist der Quadratwurzel aus dem Parameter der Bahn proportional.

Auf Grund dieser Regel aus den sechs Elementen den Ort eines Himmelskörpers für eine Reihe von Tagen vorauszusagen, eine *Ephemeride* zu rechnen, ist kein allzuschweres, bereits von Kepler vollständig gelöstes Problem.

Das Problem der »Bahnbestimmung« ist nun die Umkehrung des Problems der Ephemeridenrechnung. Es stellt die Forderung, aus Beobachtungen an einigen Tagen die sechs Elemente des Kegelschnitts abzuleiten. Die geometrisch-mechanische Fragestellung ist dabei folgende. Durch die Beobachtung eines Gestirns wird sein scheinbarer Ort unter den Gestirnen gegeben, mit anderen Worten die Richtung, in welcher es von der Erde aus erscheint, der Sehstrahl, auf welchem es sich befindet. Hat man einen Himmelskörper an drei Tagen beobachtet, so hat man hiermit drei Sehstrahlen, drei gerade Linien im Raume, auf denen sich der Körper zu diesen drei Zeiten befunden haben muß. Sind E_1, E_2, E_3 (Fig. 29) die Stellungen der Erde zu den drei Beobachtungszeiten auf ihrer bekannten Bahn EE, bezeichnen ferner die Geraden E_1A_1, E_2A_2, E_3A_3 die drei Sehstrahlen, so weiß man, daß sich der Himmelskörper zu den Beobachtungszeiten irgendwo auf diesen Sehstrahlen befunden haben muß,

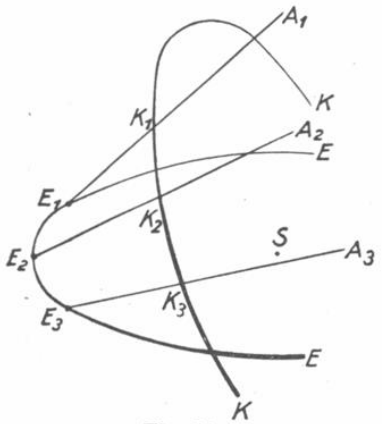


Fig. 29.

ohne daß man den genauen Ort auf jedem Sehstrahl, die Entfernung von der Erde, aus der Beobachtung direkt entnehmen könnte. Es bleibt die Aufgabe, einen Kegelschnitt KK mit der Sonne S in einem Brennpunkt so zu legen, daß er erstens durch die drei Sehstrahlen hindurchgeht, und daß zweitens ein in diesem Kegelschnitt nach den Keplerschen Gesetzen sich bewegender Himmelskörper zu den betreffenden Beobachtungszeiten auf den Sehstrahlen in den Punkten K_1, K_2, K_3 ankommt. Drei Beobachtungen ergeben durch die Forderungen, daß die Sehstrahlen von der Bahn geschnitten und zur Beobachtungszeit vom Himmelskörper erreicht werden sollen, gerade sechs Gleichungen für die unbekannten sechs Bahnelemente. Diese Gleichungen sind zu verwickelt, als daß sie direkt aufgelöst werden könnten. Die Auflösung ist vielmehr nur durch eine Reihe aufeinanderfolgender Versuche erreichbar. Olbers ist es zuerst gelungen, diese Versuche für den Fall parabolischer Bahnen, wie man sie bei den meisten Kometen voraussetzen kann, so anzuordnen, daß sie auf kurzem, geradem Wege zum Ziel führen. Die Voraussetzung parabolischer Bahn bedeutet, daß man die Exzentrizität $e = 1$ setzt, so daß statt der sechs nur noch fünf unbekannte Elemente gesucht sind. Auch ist die parabolische Bewegung an sich besonders einfach. Gauß hat in seiner »Theoria motus corporum coelestium« dasselbe für den allgemeinen Fall der Bewegung in einem beliebigen Kegelschnitt geleistet.

So oft bei der astronomischen Zentralstelle in Kiel aus irgendwelchen Teilen der Welt Beobachtungen eines neuentdeckten Himmelskörpers von drei verschiedenen Tagen eingelaufen sind, werden sofort — im Prinzip nach den Methoden von Gauß oder Olbers, denen im Laufe des letzten Jahrhunderts nur unwesentliche Verbesserungen hinzugefügt wurden, — die sechs Bahnelemente gerechnet und nebst der aus ihnen folgenden Ephemeride an die Sternwarten hinausgesandt.

Es war hier natürlich nur möglich, die Methode der Bahnbestimmung von Planeten und Kometen im knappsten Umrisse anzudeuten. Wer sich etwas eingehender mit diesem Gegenstande beschäftigen will, findet in der Schrift von J. Frischauf, »Grundriß der theoretischen Astronomie und der Geschichte der Planetentheorien.« 2. Aufl. Leipzig, Engelmann, 1903, eine ausführlichere, aber immer noch elementare Darstellung. Für ein gründliches Studium können »Die Bahnbestimmung der Himmelskörper« von J. Bauschinger, Leipzig, Engelmann, 1906, oder die Originalwerke von Gauß »Theorie der Bewegung der Himmelskörper usw.« Hannover, 1865, und Olbers »Abhandlung über die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Kometen zu berechnen.« 3. Aufl., Leipzig, 1864, empfohlen werden.