Bewegungen im Sonnensystem.

Von

JOHANN PALISA,

Adjunct an der k. k. Sternwarte.

Vortrag, gehalten am 21. December 1881.

Mit eilf Holzschnitten.

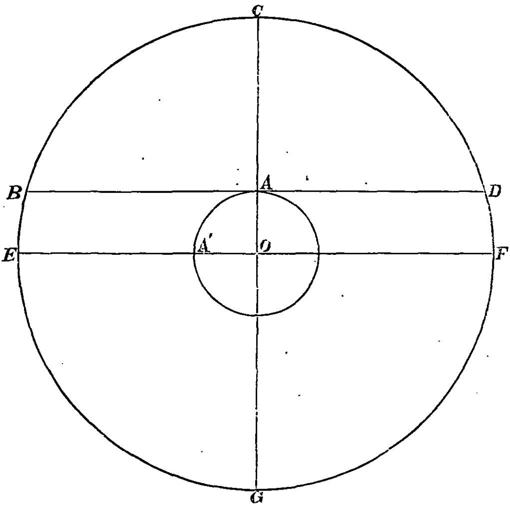
Wenn Sie, verehrte Anwesende, in einer heitren Nacht den Sternenhimmel durch längere Zeit betrachten, so werden Sie wahrnehmen, dass die Sterne am Himmel sich in bestimmten Richtungen bewegen. In jener Gegend des Himmels, wo die Sonne aufgeht, tauchen immer andere Gestirne empor, während die Sterne auf der entgegengesetzten Seite sich dem Horizonte nähern und dort untergehen. Die Linien, welche die Sterne auf diese Weise an der Himmelskugel beschreiben sind Kreise, deren Radien immer kleiner und kleiner werden, je näher die Sterne einem Punkte des Himmels sind, den wir den Nordpol desselben nennen. Der Stern, welcher an diesem Punkte steht, bleibt somit den ganzen Tag auf demselben Flecke. Diese Bewegung, an der das ganze Himmelsgewölbe theilnimmt, rührt von der Drehung der Erde um ihre eigene Axe her; sie würde sofort aufhören, sobald die Erde ihre drehende Bewegung einstellen würde, sie würde auch rascher vor sich gehen, wenn die Erde ihre Rotation beschleunigte. Man kann daher diese Bewegung des Himmelsgewölbes das Spiegelbild der Erddrehung nennen.

Ich will den Vorgang durch eine Zeichnung etwas erläutern.

Der grosse Kreis stelle das Himmelsgewölbe, der kleine die Erde vor, welche sich um den Punkt O in der Ebene des Papieres dreht und wir befänden uns in A.

Von A aus werden wir alle Sterne sehen, welche sich auf dem Theile $B\,CD$ des Himmelsgewölbes befinden. Nachdem aber das Himmelsgewölbe im Vergleich

Fig. 1.



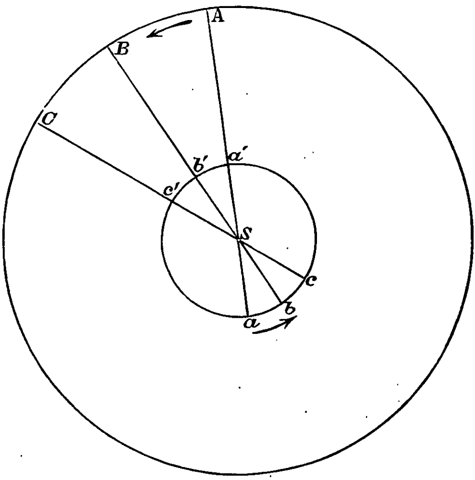
zur Erde unendlich gross ist, so müsste ich, um dem richtigen Verhältnisse mich besser zu nähern, den grösseren Kreis mit einem grössern oder den kleineren mit einem kleinern Halbmesser zeichnen. Wenn ich das letztere thue, den kleinern Kreis immer kleiner und kleiner zeichne, so wird die Linie BD immer näher an EF

rücken, bis sie mit dieser zusammenfällt. In Wirklichkeit sieht auch der Beobachter in A sämmtliche Sterne, welche sich auf dem Bogen ECF befinden, während die anderen auf dem Bogen FGE ihm durch die Erde verdeckt sind. Nach Verlauf von sechs Stunden befindet sich der Beobachter in A', der Stern bei C geht für ihn unter, der Stern bei E ist in seinem Zenith und der Stern bei G geht ihm eben auf. Dem Beobachter in A hätte sich aber dasselbe Schauspiel gezeigt, wenn der Himmel sich nach der entgegengesetzten Richtung um 90 Grade bewegt hätte, wenn also der Stern in E nach C gerückt wäre.

Wenn man aber den Himmel durch mehrere Tage genauer beobachtet, sich vielleicht eine kleine Skizze der Sterne entwirft und die helleren durch Linien mit einander verbindet, so findet man, dass die Dreiecke, Vierecke u. s. w., welche durch diese Linien entstehen, stets dieselben bleiben. Diese Sterne nennt man daher, weil sie gegeneinander ihre Lage nicht ändern, Fixsterne. Nur ganz wenige Sterne gibt es, welche diese Erscheinung nicht zeigen, sondern ihre Stellung bald langsamer, bald schneller gegen die benachbarten Sterne ändern. Diess sind die Planeten und die Kometen. Der Planeten, welche dem freien Auge durch ihren Glanz auffallen, gibt es nur wenige. Es sind dies: Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn. Sodann ist noch Uranus mit freiem Auge als nicht auffälliger Stern 5. bis 6. Grösse zu sehen, während Neptun und die erst in diesem Jahrhundert entdeckten Asteroiden nur dem bewaffneten Auge sichtbar sind. Die oben erwähnten fünf Planeten waren bereits den Alten bekannt. Wir zählen auch unsere Erde dazu, was die Alten nicht thaten. Diese hielten die Sonne für einen Planeten; ausserdem rechneten sie den Mond der Erde dazu. Die Sonne bewegt sich auch unter den Sternen, allein diese Bewegung nimmt der Laie nicht direct wahr, weil die Sterne, so lange die Sonne über dem Horizonte ist, dem unbewaffneten Auge nicht sichtbar sind. Er gelangt erst zur Kenntnis dieser Bewegung, wenn er mit der Uhr in der Hand die Zeiten beobachtet, zu welcher irgend ein Fixstern auf oder untergeht. Er wird dann finden, dass dies täglich um circa 4 Minuten früher, als den vorangehenden Tag erfolgt. Er wird daraus schliessen, dass sich der Fixsternhimmel gegen die Sonne oder die Sonne auf dem Fixsternhimmel verschoben hat. Letzteres ist das Richtige und auch die Alten waren dieser Ansicht, nur deuteten sie es anders als wir. Denn ebenso, wie sich dem Beobachter dasselbe Schauspiel darbietet, ob sich das Himmelsgewölbe um die Erde oder die Erde um ihre eigene Axe dreht, ebenso erzeugt die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne dieselbe Erscheinung am Himmel, als eine sich in einem Jahre um die Erde bewegende Sonne.

Wenn uns auch von den alten Philosophen Aeusserungen hinterlassen sind, welche wir jetzt nachträglich dahin deuten, dass der eine oder der andere den richtigen Sachverhalt ahnte, so waren diese Aeusserungen doch so unklar gehalten, dass der Ruhm des Copernicus in nichts geschmälert wird. Copernicus war es, welcher klar und deutlich behauptete, dass die Erde in einem Tage sich um sich selbst bewege und dass die Erde, so wie die anderen Planeten, um die Sonne kreisen. Er nahm an, dass diese Bewegungen in Kreisen vor sich gehen, obwohl ihm der Umstand der ungleichen Bewegungen bekannt war, den er aber auf eine andere Weise erklärte. Dass die Bewegung nicht in Kreisen vor sich gehe, son-

Fig. 2.



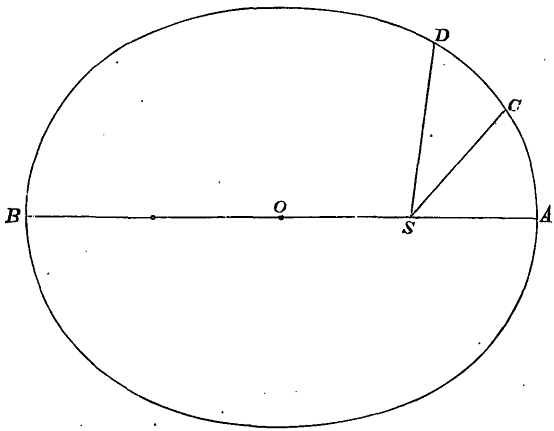
dern in Ellipsen und wie dieselbe sonst noch beschaffen ist, das lehrte Kepler, welcher das Resultat seiner Untersuchungen in seine berühmten drei Gesetze der Planetenbewegung zusammenfasste.

Es sei S die feststehende Sonne, der grosse Kreis die Himmelssphäre mit den Fixsternen, ferner der kleine Kreis die Erdbahn, in welchem sich die Erde im

Sinne des Pfeiles, also umgekehrt wie der Zeiger einer Uhr bewegt. Wenn die Erde in a steht, so sieht ein Beobachter die Sonne in der Richtung gegen A und da er keine Vorstellung von ihrer Entfernung hat, so versetzt er sie in die Nähe des Sternes, der sich bei A befindet. Ist die Erde nach b gerückt, so wird die Sonne bei dem Sterne B gesehen. Dem Beobachter auf der Erde wird daher die Sonne sich von A nach B zu bewegen scheinen. Diese Bewegung geschieht im verkehrten Sinne des Zeigers einer Uhr, also im selben Sinne wie die Bewegung der Erde. Allein auch der Winkel, um welchen sich die Erde von der Sonne aus gesehen, bewegt hat, der Winkel aSb ist gleich dem Winkel ASB, um welchen die Sonne dem Erdenbewohner weiter gerückt ist. Sei nun die Erde in derselben Anzahl von Tagen, welche sie gebraucht, um von a nach b zu gelangen, von b nach c gewandert, die Sonne demnach von B nach C, so werden wir aus der Grösse des Bogens BC auf die Grösse des Winkels bSc schliessen können; oder mit anderen Worten, wir gelangen zur Kenntnis der von der Erde zurückgelegten Winkel, wenn wir die Bögen bestimmen, um welche die Sonne am Himmel weitergerückt ist. Stellen Sie sich aber vor, die Erde wäre in S und die Sonne hätte nach einander die Positionen a', b' und c', so wird der Beobachter auf der Erde genau denselben Vorgang am Himmel wahrnehmen, wie früher. Er ist also von Vornherein nicht im Stande zu entscheiden, welcher Körper der sich bewegende ist. Ich werde später von diesem Umstande Gebrauch machen und mir bei der Besprechung gewisser Erscheinungen von einer Bewegung der Sonne am Himmel um die Erde zu sprechen erlauben.

Das erste Kepler'sche Gesetz lautet: Die Planeten bewegen sich in Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. Sei in folgender Figur 3 eine solche Ellipse dargestellt: O ist der Mittelpunkt, S der eine

Fig. 3.



Brennpunkt, in welchem die Sonne steht; die Verbindungslinie OS trifft in ihrer Verlängerung die Ellipse in den Punkten A und B. Diese Linie heisst die grosse Axe und ist die längste gerade Linie, welche innerhalb der Ellipse gezogen werden kann. Der Punkt A, der dem Brennpunkte am nächsten liegende Punkt der Peripherie heisst Perihel oder Sonnennähe; der Punkt B, der entfernteste von *S* Aphel oder Sonnenferne. Jede von *S* gegen die Peripherie gezogene gerade Linie heisst Radius rector.

Das zweite Kepler'sche Gesetz sagt: Die von den Radien rectoren in gleichen Zeiten beschriebenen Flächenräume sind gleich.

Es bewege sich ein Planet von *A* über *C* nach *B* und lege das Stück *A C* in derselben Zeit zurück wie *C D*. Zu Folge des eben citirten Gesetzes müssen die Flächen *A S C* und *C S D* gleich sein. Da aber die Radien *D S* und *C S* grösser sind als *C S* und *A S*, so muss offenbar der Winkel *C S D* kleiner sein, als der Winkel *A S C*. Der Planet hat demnach einen kleinern Weg zurückgelegt, die Winkelgeschwindigkeit hat abgenommen und sie wird so lange abnehmen, als die Radien grösser werden, also bis der Planet in *B* angelangt ist; von da an wird wieder die Winkelgeschwindigkeit zunehmen.

Die grosse Axe *A B* theilt die Ellipse in zwei gleich grosse Hälften; es wird demnach der Planet dieselbe Zeit benöthigen um von *A* nach *B* zu gelangen, wie von *B* nach *A*.

Alles bisher Gesagte gilt auch von der Erde. Dieselbe bewegt sich in den verschiedenen Theilen ihrer Bahn mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten und wir sehen demnach auch die Sonne sich mit verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten bewegen.

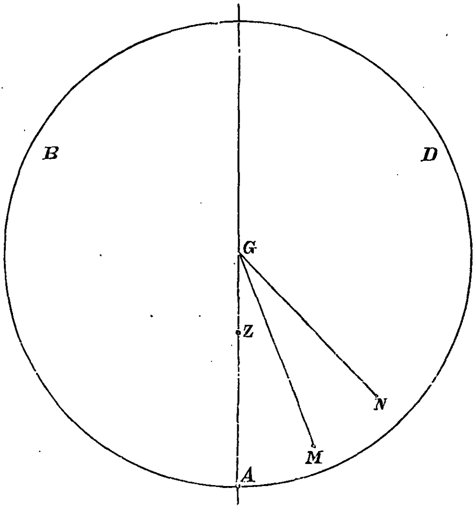
Weil aber der Stand der Sonne die Functionen des bürgerlichen Lebens regelt, so bin ich zu einem Punkte gelangt, wo die Astronomie praktisch wird.

Heutzutage besitzt beinahe ein Jeder, wenn er nur halbwegs vermögend ist, eine Uhr und wenn möglich auch eine gute Uhr; ja es gibt auch solche, die damit Sport treiben. Gesetzt den Fall so ein Sportsman wäre nicht in der Lage seine Uhr zu controliren, sei's bei einem Uhrmacher, welche sich gewöhnlich rühmen, die richtige Wiener Zeit in ihren Auslagen zu haben oder sei es mit dem so bequemen Mittagszeichen der Sternwarte am Hof, so wird er gezwungen sein, Erscheinungen der Natur zu Hilfe zu nehmen, welche mit der grössten Regelmässigkeit wiederkehren. Als solche dürfte ihm die Umdrehung der Erde um ihre eigene Axe bekannt sein. Er wird also, wenn er in der praktischen Astronomie etwas zu Hause ist, anfangen einen oder den andern Stern im Meridian zu beobachten. Der Umstand jedoch, dass zwischen je zwei Meridiandurchgängen 23 Stunden 56 Minuten 4 Secunden verfliessen, dass in Folge dessen die Passage des Sterns täglich um 4 Minuten früher erfolgt, wird ihn verdriessen und er wird zur Sonne seine Zuflucht nehmen und deren Meridiandurchgang beobachten. Allein da wird er gar nicht zum Ziele kommen, wenn ihm nicht das Wesen der Zeitgleichung, deren Grösse und Anwendung bekannt sind.

Es sei P der Nordpol des Himmels, Z das Zenith, somit die durch P und Z gezogene Linie der Meridian; in A passire gerade ein Stern den Meridian. Nach Verlauf von 23 Stunden 56 Minuten 4 Secunden unserer bürgerlichen Zeit wird derselbe über B und D wieder in A eintreffen. Die Zeit zwischen zwei solchen aufeinanderfolgenden Durchgängen, welche die Astronomen auch Sterntag nennen, ist, wie Sie wissen, stets die gleiche.

Gesetzt den Fall, die Sonne stünde gleichzeitig mit einem Sterne in A, so wird sie nach Verlauf eines Sterntages nicht wieder in A stehen, sondern wird den Meridian etwas später passiren, weil sie sich mittlerweile zu dem Stern in M hinbewegt hat. Ebenso gelangt sie den nächstfolgenden Tag nach N. Würde der Winkel APM

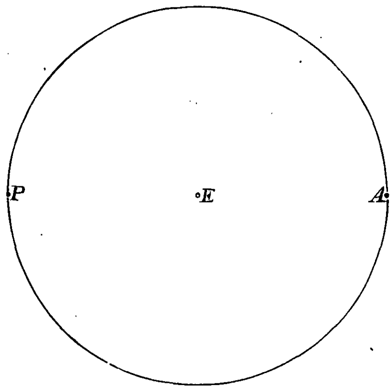
Fig. 4.



gleich sein dem Winkel MPN, so würde die Verspätung der Sonne am ersten Tage gegen den Stern in A gleich sein der Verspätung am zweiten Tage, gegen den Stern in M oder mit anderen Worten: die Zeiten zwischen den auf einanderfolgenden Culminationen wären gleich. Das ist nun nicht der Fall; die Winkel APM werden bald grösser, bald kleiner. Der Astronom kann daher die Sonne nicht direct zur Regulirung der Uhren verwenden, und ich werde zeigen, wie man sich hiebei geholfen hat.

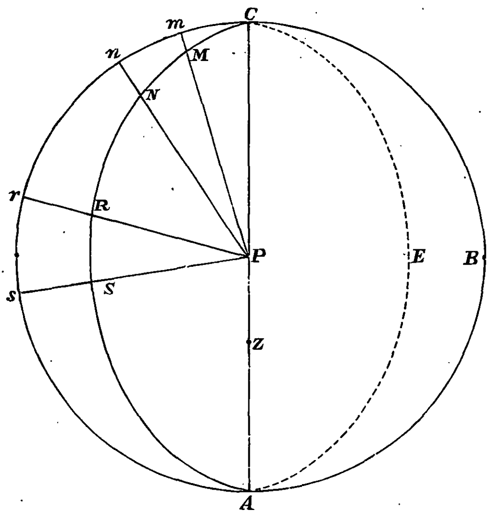
In E sei die Erde und in dem Kreise beschreibe die Sonne ihre jährliche Bahn. Man nennt diesen Kreis, welcher mit dem Aequator einen unter dem Namen Schiefe der Ekliptik bekannten Winkel von $23^0\ 27'$ einschliesst, Ekliptik.

Fig. 5.



Wenn die Sonne in P ist, so sei die Erde in Perihel, wenn die Sonne in A ist, so sei die Erdel im Aphel. Die Sonne wird sich daher in der Nähe von P am raschesten, in der Nähe von A am langsamsten bewegen. Neben der ungleichförmig schnell sich bewegenden Sonne denken wir uns eine sich gleichförmig bewegende Sonne, welche wir mittlere nennen wollen und welche mit der ersten gleichzeitig durch P und A geht. Wenn wir im Stande sind, den Unterschied zwischen unserer mittleren Sonne und der wahren in jedem Momente anzugeben, so werden wir dann die wahre Sonne beobachten und diesen Unterschied an die Beobachtung entsprechend anbringen, wodurch unsere Beobachtung so gestellt wird, als ob wir

Fig. 6.



die mittlere Sonne beobachtet hätten. Diesen Unterschied anzugeben sind wir aber mit Hilfe des zweiten Kepler'schen Gesetzes im Stande. Sehen wir aber weiter nach, ob diese mittlere Sonne unserm Zwecke entspricht.

In beistehender Figur 6 bedeute wieder P den Nordpol, Z das Zenith, somit $CPZA$ den Meridian, $ABCD$ sei der Aequator und $AECF$ die Ekliptik, in welchem die wahre und unsere mittlere Sonne einmal im Jahre herumkommt. Ich bezeichne ferner mit CM, MN .... RF den Weg, welchen die Sonne in je einem Tage zurücklegt. Da diese Wege von der mittleren Sonne zurückgelegt werden, so sind diese Stücke gleich gross. Verlängern wir die Linien PM, PN, ... PR, PS u. s. w. bis sie den Aequator in m, n, ... r s, treffen, so wird die Sonne offenbar zur selben Zeit, wie die in m, n, ... r, s .. stehenden Sterne culminiren. Wir können daher auch annehmen, dass sich die Sonne von C nach m, nach n ... nach r, s u. s. w. bewegt hat. Ein Blick auf die Figur zeigt aber sofort, dass die Strecken Cm, mn .... rs u. s. w. ungleich gross sind und insbesonders, dass rs grösser als Cm oder mn ist. Es folgt daraus, dass die oben angenommene mittlere Sonne auch nicht zur Regulirung der Uhren zu brauchen ist. Man hat daher zu einer zweiten mittleren Sonne die Zuflucht genommen, welche kurz die mittlere Sonne heisst und diese zweite mittlere Sonne lässt man im Aequator gleichförmig sich bewegen und mit der ersten mittleren Sonne die Punkte C und A, welche die Nachtgleichenpunkte sind, gleichzeitig passiren. Die Differenz zwischen der Projection der ersten mittleren Sonne auf die Ekliptik und dem zugehörigen Ort der zweiten mittleren Sonne findet man sodann leicht mit Hilfe der Sätze der sphärischen Trigonometrie. Der Unterschied zwischen den Culminationszeiten der wahren und der mittleren Sonne heisst Zeitgleichung und wir haben jetzt nur nöthig, um diese Grösse unserer Sonnenbeobachtung zu corrigiren, um dieselbe sofort auf eine, mit gleichförmiger Geschwindigkeit im Aequator sich bewegende Sonne zu beziehen. Weil das Berechnen der Zeitgleichung sehr häufig und von vielen Beobachtern gemacht werden müsste, so hat man die Einrichtung getroffen, dass an gewissen Sternwarten diese Angabe für jeden Tag vorausberechnet und mit andern auch vorausberechneten Angaben publicirt wird. Eine solche Zusammenstellung findet der Laie in dem von der Wiener Sternwarte publicirten, bei Carl Gerold & Sohn erschienenen astronomischen Kalender für 1882. Auf der zweiten Seite eines jeden Monats lautet die Ueberschrift der letzten Columne: Uhren im wahren Mittag. Das will sagen: Im Momente, wo die wahre Sonne den Meridian passirt, zeigt eine die richtige mittlere Zeit zeigende Uhr, die in der Columne enthaltene Zeit. Ich setze hier einige Daten an:

	h	m	s
1. Jänner	12	3	52·5
1. Februar	12	13	51·1
11. „	12	14	27·6
1. März	12	12	31·3
1. April	12	3	54·7
15. „	11	59	59·6
1. Mai	11	56	57·7
14. „	11	56	7·1
1. Juni	11	57	32·0
14. „	11	59	56·0
1. Juli	12	3	31·5
26. „	12	6	15·6
1. August	12	6	4·7
1. September	11	59	52·7

	h	m	s
1. October	11	49	33·6
1. November	11	43	41·5
3. „	11	43	40·5
1. December	11	49	13·2
24. „	11	59	49·8

Wenn Sie diese Zahlenangaben näher betrachten, so finden Sie, dass die Abweichung im Anfang des Jahres wächst, am 11. Februar mit $14^m\ 27{\cdot}6^s$ ihr Maximum erreicht und am 15 April das erste Mal Null wird; sodann wird die Abweichung wieder grösser aber im andern Sinn, erreicht wieder ein Maximum u. s. w. Die Maxima der Abweichung betragen:

	m	s
am 11. Februar	14	27·6
„ 14. Mai	3	52·9
„ 26. Juli	6	15·6
„ 3. November	16	19·5

während viermal die Abweichung die Null passirte.

Ich will Sie jetzt noch auf einige Consequenzen der Zeitgleichung aufmerksam machen.

Jeder von Ihnen dürfte eine Sonnenuhr gesehen haben. Soll diese Uhr richtig construirt sein, so muss sie die wahre Zeit zeigen. Hätte ich z. B. eine solche aufzustellen und wollte ich, nachdem der Stab seine richtige Stellung bereits erhalten hat, am 11. Februar den Mittagsstrich ziehen, so müsste ich so lange mit der Markirung des Schattens warten, bis meine richtig zeigende Uhr $12^h\ 14^m\ 27{\cdot}6^s$ zeigt. Und umgekehrt müsste ich gleichfalls die Zeitgleichung berücksichtigen, wenn ich mit Hilfe einer Sonnenuhr meine Uhr rectificiren wollte. Ein anderer Punkt, dessen ich erwähnen will, ist der folgende: Wenn Sie z. B. Seite 30 des bereits erwähnten Kalenders aufschlagen, so finden Sie, dass am 11. Februar der Aufgang der Sonne um 7^h 16^m und der Untergang um 5^h 15^m notirt ist. Wenn Sie nicht an die Zeitgleichung denken und etwa die Zeit von Aufgang bis Mittag rechnen, indem Sie von 12 Stunden 7 Stunden 16 Minuten abziehen, was 4 Stunden 44 Minuten ausmacht und ebenso dann die Zeit von Mittag bis Untergang mit 5 Stunden 15 Minuten berechnen, so wird Ihnen die Richtigkeit der Angabe sehr bedenklich erscheinen, da sie keinen Grund wissen, wesshalb der Nachmittag länger als der Vormittag dauern sollte. Der Kalender gibt aber an, wie viel eine nach mittlerer Zeit gehende Uhr zeigt, wenn die Sonne auf- und wenn sie untergeht. Dieselbe Uhr zeigt aber 12 Uhr $14\frac{1}{2}$ Minuten, wenn die Sonne die Hälfte ihres Tagebogens zurückgelegt hat. Machen Sie aber jetzt die Rechnung so: 12 Stunden $14\frac{1}{2}$ Minuten weniger 7 Stunden 16 Minuten gleich 4 Stunden $58\frac{1}{2}$ Minuten und 5 Stunden 15 Minuten weniger 0 Stunden $14\frac{1}{2}$ Minuten gleich 5 Stunden $0\frac{1}{2}$ Minuten, so finden Sie beinahe gleich grosse Angaben. Die noch bestehende Differenz rührt aber von der Bewegung der Sonne nach Norden her.

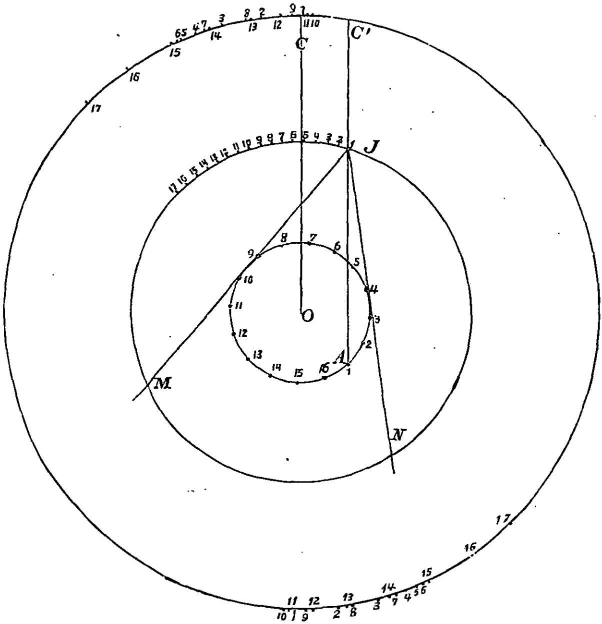
Die Zeitgleichung nimmt im Jänner und Februar derart zu, dass die Zeit zwischen mittleren Mittag und Untergang rascher anwächst, als die Zeit zwischen Aufgang und mittlerem Mittag. Da aber die meisten Menschen die Länge des Tages nur nach der Zeit beurtheilen, wann es finster wird, so hört man öfters im Jänner und Februar sagen: Der Tag hat merklich zugenommen. Wie Sie leicht sehen, wird da am 11. Februar der Nachmittag um eine Viertelstunde zu lang geschätzt und demnach der ganze Tag um eine halbe Stunde.

Ich gehe nun über zu der Bewegung der andern Planeten, wie dieselbe von der Erde aus gesehen, am Himmel erscheint und da muss ich einen Unterschied zwischen innern und äussern Planeten machen. Innere Planeten nennen wir diejenigen, deren Bahn innerhalb der Erdbahn zu liegen kommt. Es sind diess Mercur und Venus, während die Existenz eines dritten zwischen Mercur und Sonne kreisenden Planeten, der aber bereits mit dem Namen Vulcan versehen wurde, noch ganz zweifelhaft ist. Aeussere Planeten sind die übrigen, deren Bahnen die Erdbahn einschliessen.

Stelle mir O die Sonne, der erste kleine Kreis die Erdbahn, der zweite die Bahn eines äussern Planeten und der grosse die Himmelskugel dar; in A_1 sei die Erde, in J_1 ein Planet. Derselbe wird von A_1 aus bei dem Stern bei C' gesehen. Allein wie in einem frühern Falle begeht man auch hier dadurch einen Fehler, dass man das Himmelsgewölbe zu klein im Verhältnis zur Erd- und Planetenbahn zeichnet. Um mich der Wahrheit zu nähern, müsste ich Erd- und Planetenbahn verkleinern; es wird sich die Visurlinie $A\,C'$ parallel fortwährend verschieben, bis sie mit $O\,C_1$ zusammenfällt. Es ist demnach C_1 der Punkt der Himmelssphäre, in welchem der

Planet in J_1 von A_1 aus gesehen, zu stehen scheint. Auf ganz ähnliche Weise werde ich die Oerter an der Himmelskugel construiren, in denen nach einander der Planet J von der Erde aus gesehen erscheint. Die Erde bewege

Fig. 7.

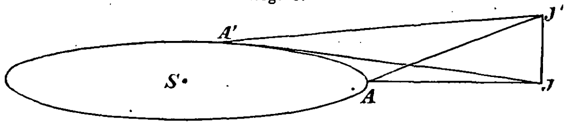


sich in ihrer Bahn vorläufig ganz gleichförmig durch die Punkte A_1, A_2 u. s. w., welche ich in gleichen Intervallen verzeichne. Ebenso nehme ich an, dass der Planet J sich gleichmässig bewege; da er aber von der Sonne entfernter ist, so wird er in derselben Zeit bedeutend kleinere Wege als die Erde zurücklegen. Die einzelnen Stationen seiner Bahn bezeichne ich mit J_1, J_2, J_3 u. s. w. Ich construire jetzt auf die bereits angegebene Weise die Punkte C_1, C_2, C_3 u. s. w., in welchen der Planet von der Erde gesehen, zu sein scheint.

Diese Oerter heissen in der Astronomie geocentrische Oerter; die Bewegung von einem geocentrischen Ort zum nächsten will ich die scheinbare Bewegung nennen. Wir bemerken nun Folgendes: der Sinn der Bewegung von C_1 nach C_2 ist identisch mit jenen von J_1 nach J_2, sie ist also direct; das Stück $C_1 C_2$, ist grösser als $C_2 C_3$ und dieses wieder grösser als $C_3 C_4$; die scheinbare Bewegung wird also fortwährend kleiner. In der Nähe von C_6 kehrt sie um, da C_7 bereits rechts von C_6 liegt. Es muss also in der Nähe von C_6 einen Punkt gegeben haben, in welchem der Planet seine scheinbare directe Bewegung verloren und die nunmehrige Bewegungsrichtung, welche retrograd genannt wird, angenommen hat. Er war also eine kurze Zeit im Stillstande. Die retrograde Bewegung nimmt fortwährend zu, da die einzelnen Intervalle grösser werden. In der Nähe von C_8 ist die retrograde Bewegung am grössten und nimmt sodann wieder ab, bis sie in der Nähe von C_{10} ganz aufhört, um wieder in die ursprüngliche, directe überzugehen. Die nunmehrige directe Bewegung nimmt rasch zu und ein Blick auf die Zeichnung zeigt Ihnen, dass die directe Bewegung, z. B. zwischen C_{16} und C_{17} grösser ist, als früher die retrograde in ihrem Maximum. Die retrograde Bewegung hat ihr Maximum in dem Augenblicke, wo die Erde genau zwischen Planet und Sonne steht. Diese Stellung des Planeten zur Erde heisst Opposition. In dieser Stellung ist der Planet der Erde am nächsten und es ist leicht einzusehen, dass er auch am hellsten sein wird. Die entgegengesetzte Stellung, in welcher die Sonne zwischen Planet und Erde steht, heisst Conjunction. Zur Zeit der Conjunction ist der Planet für uns unsichtbar, weil er sowohl wegen der grössten Entfernung am schwächsten ist, als auch hauptsächlich desshalb, weil er in der nächsten Nähe der Sonne sich befindet. Die in der Mitte liegenden Stellungen heissen Quadraturen. Die Opposition eines äussern Planeten ist die günstigste für seine Beobachtung, weil mit der Zunahme der Helligkeit auch der scheinbare Durchmesser der grösste ist und alles Detail, welches dessen Oberfläche darbietet, am deutlichsten zu sehen ist. Die Asteroiden werden fast ausschliesslich zur Zeit der Opposition entdeckt und beobachtet; dasselbe war auch bei der Entdeckung der Marsmonde im Jahre 1877 der Fall. Indess erscheint ein Planet nicht in allen Oppositionen gleich hell. Es kommt hier die elliptische Gestalt der Bahn in's Spiel; ein Planet wird desto heller sein, je näher er sich dem Perihel befindet, da er dann gleichzeitig näher zur Sonne und näher zur Erde ist.

Wenn die Planeten sich in derselben Ebene wie die Erde, also in der Ekliptik bewegen würden, so müssten dieselben während ihrer retrograden Bewegung dieselben Sterne passiren, wie bei der directen. Dieser Fall tritt jedoch gar nie ein. Die Planetenbahnen haben stets auch eine grössere oder geringere Neigung gegen die Erdbahn und die geocentrischen Oerter werden daher bald über, bald unter der Ekliptik sich befinden. Die scheinbare Bewegung lässt sich daher auch in zwei Theile zerlegen, in eine mit der Erdbewegung parallele und eine darauf senkrechte. In Folge des ersten Theils werden die Planeten bald direct, bald retrograd laufen und in Folge des zweiten Theiles sich von der Ekliptik entfernen oder sich derselben nähern. Die Nähe der Opposition wird sich dadurch manifestiren, dass der Winkel, den der Planetenort mit der Ekliptik einschliesst, grösser ist, als bei einer andern Stellung zur Sonne, was

Fig. 8.



beistehende Figur veranschaulichen soll, in welcher die langgestreckte Ellipse die Erdbahn perspectivisch vorstellt. Der Planet stehe in J', JJ' sei eine Senkrechte von J' auf die verlängerte Erdbahn gezogen. Ist der Planet in Opposition, die Erde demnach in A, so erscheint er von der Erde gesehen um den Winkel JAJ' über der Ekliptik. Ist aber die Erde in A', der Planet also nicht in Opposition, während seine Erhebung über die Ekliptik dieselbe geblieben ist, so erscheint er unter dem Winkel $JA'J'$ über der Ekliptik. $JA'J'$ ist aber offenbar kleiner als JAJ'.

Dieses mit der Opposition zusammenhängende Auf- und Absteigen über oder unter der Ekliptik verquickt sich mit der wirklich stattfindenden Erhebung des Planeten über derselben und mit der parallel mit der Ekliptik vor sich gehenden directen und retrograden Bewegung derartig, dass die scheinbare Bewegung jene ganz eigenthümlichen Formen (Fig. 9) annimmt, welche man mit dem Namen Schleifen bezeichnet. Die Schleife eines äussern Planeten bildet sich, sobald sich derselbe seiner Opposition nähert.

Ganz dieselben Erscheinungen finden statt, wenn der Planet ein innerer ist. Ich werde sofort die aufeinanderfolgenden Positionen des Planeten erhalten, wenn ich in Figur 7 in J mir die Erde und in A den innern

Fig. 9.

Planeten laufend denke. Ich werde genau dieselben Constructionen auszuführen haben, mit dem Unterschiede, dass ich die Visurlinie nach der entgegengesetzten Richtung ziehen muss. Der Planet wird dann die Positionen D_1, D_2, ... D_{16}, D_{17} u. s. w. einnehmen. Der Verlauf der Erscheinungen ist demnach derselbe; auch hier findet eine directe und eine retrograde Bewegung statt.

Ein innerer Planet kann jedoch nie jene Stellung gegen die Sonne einnehmen, welche wir Opposition nennen, dagegen passirt er zweimal, von der Erde gesehen, die Nähe der Sonne, das eine Mal, wenn er sich zwischen Erde und Sonne durchbewegt, das andere Mal, wenn die Sonne zwischen ihm und der Erde sich befindet. Der

Planet hat daher zwei Conjunctionen: die erste heisst die untere, die zweite die obere Conjunction. In der untern Conjunction ist die Bewegung des Planeten retrograd, in der obern direct.

Denken Sie sich, die Erde würde durch mehrere Jahre hindurch stille stehen, so werden die äusseren Planeten alle möglichen Winkel mit der Sonne einschliessen; da hingegen können sich die inneren Planeten nie über einen gewissen Winkel von der Sonne entfernen. In Figur 7 ist OJM und OJN jener Winkel. Ein innerer Planet scheint somit um die Sonne hin- und herzupendeln. Wir nennen die Zeit zwischen einer Opposition eines äussern Planeten bis zur nächsten Opposition, ebenso die Zeit von einer untern Conjunction zur nächsten, die synodische Umlaufszeit. In dem Falle der stillstehenden Erde würde daher die synodische Umlaufszeit mit der wirklichen Umlaufszeit der siderischen Umlaufszeit zusammenfallen, da aber die Erde sich bewegt, so wird ein Unterschied eintreten, der sich darin äussert, dass die synodische Umlaufszeit bei äusseren Planeten grösser oder kleiner, bei inneren Planeten stets grösser als die siderische Umlaufszeit ist. Hat nämlich ein innerer Planet einen Umlauf vollendet, so findet er nicht mehr die Erde an ihrer Stelle, es kann daher keine Conjunction eintreten; dies wird erst der Fall, wenn er dieselbe eingeholt hat; hingegen läuft nach der Opposition eines äussern Planeten die Erde voran und holt ihn ein. Geschieht dies wie bei Mars nach Vollendung eines siderischen Umlaufes, so ist die synodische Umlaufszeit grösser, geschieht dies früher, wie bei Jupiter u. s. w., so ist dieselbe kleiner als die siderische Umlaufszeit.

Ich notire an dieser Stelle die Umlaufszeiten einiger Planeten:

	Siderisch	Synodisch
Mercur	88 Tage	116 Tage
Venus	225 „	584 „
Mars	687 „	779 „
Jupiter	4332 „	399 „
Saturn	10759 „	377 „

Wir haben gesehen, dass bei einem äussern Planeten die Zeit seiner grössten Helligkeit mit der Opposition zusammenfällt.

Anders ist es bei den innern Planeten. Wenn auch das Gesetz, dass die Lichtstärke mit dem Quadrate der Entfernung des Planeten von der Sonne und von der Erde abnimmt, seine Giltigkeit beibehält, so kommt der Umstand hinzu, dass der Planet in jener Stellung, wo nach obigem Gesetze die grösste Helligkeit eintritt, der Erde seine dunkle Seite zukehrt. Es tritt daher die grösste Helligkeit in einer andern Stellung zur Sonne ein, welche für Venus etwa in der Mitte zwischen grösster Elongation und unterer Conjunction liegt.

Bei der Betrachtung der Bewegungserscheinungen der Planeten, wie sie sich uns am Himmel darstellen, habe ich vorausgesetzt, dass die Bahnen derselben kreisförmige, dass die Geschwindigkeiten, von der Sonne aus betrachtet, gleichförmige sind und dass die Bewegungen alle in derselben Ebene stattfinden. Das ist nun nicht der Fall, aber die Abweichungen von meiner Voraussetzung sind nicht so gross, als dass sie den Charakter der erläuterten Erscheinungen ändern würden. Der Umstand, dass die Planeten zufolge der beiden ersten Kepler'schen Gesetze sich ungleich schnell in den verschiedenen Theilen ihrer Bahn bewegen, hat nur das zur Folge, dass die Dauer von einer Conjunction zur nächsten verschieden lang sein wird, dass demnach die synodische Umlaufszeit nur als mittlerer Werth angegeben werden kann.

Ich übergehe nun zum dritten Kepler'schen Gesetze, welches lautet:

Die Quadrate der Umlaufszeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer halben grossen Axen.

Durch dieses Gesetz wird eine Relation zwischen den Planeten aufgestellt, welche uns gestattet, aus den bekannten Umlaufszeiten die Verhältnisse der grossen Axen und alles damit Zusammenhängende, also auch die Verhältnisse der gegenseitigen Entfernungen zu berechnen, und zwar mit derselben Genauigkeit, mit welcher die Umlaufszeiten bekannt sind; diese letzteren sind aber sehr genau ermittelt. Sind wir dann im Stande, eine einzige dieser Distanzen in Meilen oder Kilometern anzugeben, so wissen wir mit einem Schlage alle anderen in demselben Maasse.

Diese eine Distanz, an deren Bestimmung schon so viel Mühe und die verschiedensten Methoden angewendet wurden, ist die Distanz der Erde von der Sonne. Die Bestimmung derselben bildet das Problem der Sonnenparallaxe.

Ich habe gesagt, dass die Umlaufszeiten sehr genau bekannt sind, und will nun zeigen, auf welchem Wege man zu dieser äusserst genauen Kenntniss gelangt ist. Man findet die Umlaufszeit, indem man aus dem Beobachtungsmaterial zwei zu verschiedenen Zeiten gemachte Beobachtungen heraussucht, denen man nachweisen kann, dass sie sich auf denselben Ort, von der Sonne aus gesehen, beziehen. Da eine beiläufige Kenntniss der Umlaufszeit leicht zu erhalten ist, so wird man auch im Stande sein festzustellen, wie viele volle Umläufe zwischen diese Beobachtungen fallen. Durch diese Zahl dividirt man sodann die Zwischenzeit. Angenommen, dass die Beobachtungen mit solchen Instrumenten angestellt sind, welche das Eintreffen an einem vorher bestimmten Punkte nur auf einen Tag genau zu erkennen gestatten, so wird die aus zwei, einen einzigen Umlauf einschliessenden Beobachtungen gefolgerte Umlaufszeit auf zwei Tage unsicher sein. Nimmt man aber zwei Beobachtungen, zwischen denen vielleicht 10 Umläufe liegen, so wird die Unsicherheit nur mehr $^2/_{10}$ Tage betragen. So ist z. B. die Umlaufszeit des Mars 686·9798 Tage. In Folge der Anfangsbeobachtung ist man auf einen Tag unsicher; es könnte daher ebenso die Umlaufszeit 685·9798 oder 687·9798 Tage sein; da aber auch die Erdbeobachtung um einen Tag unsicher ist, so schwankt 685·9798 zwischen 684·9798 und 686·9798 und 687·9798 zwischen 686·9798 und 688·9798; mithin schwankt die Umlaufszeit zwischen 684·9798 und 688·9798. Da die wirkliche Umlaufszeit 686·9798 beträgt, so ist die Unsicherheit zwei Tage.

Für zwei Beobachtungen aber, welche 10 Umläufe auseinanderliegen, ist das richtige Zeitintervall 6869·798 Tage. Diese Zahl wird schwanken zwischen 6867·798 und 6871·798. Dividirt man jetzt durch 10, so wird die Umlaufszeit schwanken zwischen 686·7798 und 687·1798. Die Unsicherheit beträgt somit nur mehr 0·2. Sie sehen ein, dass die Umlaufszeit desto genauer erhalten wird, je weiter die zu den Bestimmungen verwendeten Beobachtungen auseinanderliegen. Ist die eine Beobachtung gut, so ist die Unsicherheit nur von der Unsicherheit der andern Beobachtung abhängig und beträgt in unserm Beispiele nur die Hälfte. Es wird Ihnen jetzt klar sein, warum viele, der aus dem Alterthume überkommene Beobachtungen für uns von so grossem Werthe werden können, trotzdem sie mit ziemlichen Unsicherheiten behaftet sind.

Ich will jetzt ein Beispiel anführen, wie man mit Hilfe des dritte Kepler'schen Gesetzes aus den Umlaufszeiten die Dimensionen der Bahnen findet, und nehme die Erde und den Mars als Beispiel. Erstere hat eine Umlaufszeit von 365·2564, letztere eine Umlaufszeit von 686·9798 Tagen. Ich bilde die Quadrate der Umlaufszeiten wie folgt:

$$365{\cdot}2564 \times 365{\cdot}2564 = 133412{\cdot}2,$$
$$686{\cdot}9798 \times 686{\cdot}9798 = 471941{\cdot}3.$$

Die Zahl, welche mit sich selbst dreimal multiplicirt 133412·2 gibt oder zu welcher 133412·2 die dritte Potenz ist, ist 51·09736 und für 471941·3 77·85670. Es verhalten sich somit die halben grossen Axen wie 51·09736 zu 77·85670 oder wie 1·00000 zu

1·523697; das heisst die halbe grosse Axe der Marsbahn ist 1·523697mal so gross als die der Erdbahn.

Ich habe bisher die Bewegungserscheinungen der Planeten erörtert, allein es gibt noch andere Körper, welche dem Sonnensystem angehören; ich meine die Kometen. Dieselben bewegen sich meistentheils in Parabeln, viele in Ellipsen und einige auch in Hyperbeln. Immer liegt die Sonne in einem Brennpunkte der betreffenden Curve. Die Geometrie sagt über die Parabel, dass dieselbe nichts Anderes als eine Ellipse ist, deren grosse Axe unendlich gross ist. Die Umlaufszeit eines Körpers, der eine solche Bahn lauft, ist demnach zu Folge des dritten Kepler'schen Gesetzes unendlich gross oder mit andern Worten er kommt und geht auf Nimmerwiedersehen wieder weg. Von den Kometen gelangt in der Regel nur ein kleines Stück der Bahn zur Beobachtung und da auch meistens das Stück um das Perihel herum. An dieser Stelle ist aber die Parabel einer Ellipse sehr ähnlich. Das hat dann zur Folge, dass den Beobachtungen durch eine Parabel oder auch durch eine Ellipse genügt werden kann, ohne dass man nöthig hätte, grössere als die zufälligen Beobachtungsfehler anzunehmen. Man ist in einem solchen Falle bezüglich der Umlaufszeit sehr unsicher.

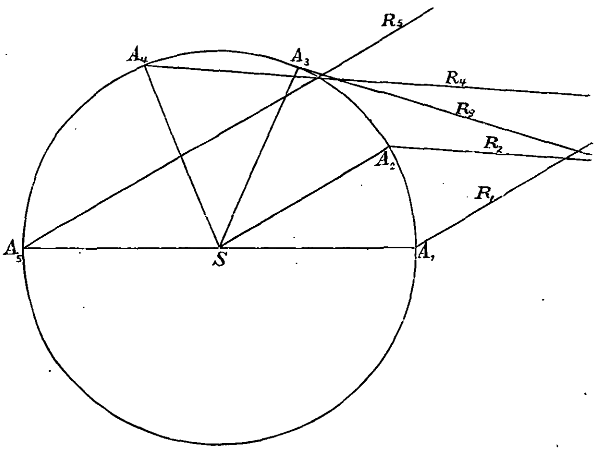
Während die Planetenbahnen nur geringe Neigungen gegen die Ekliptik aufzuweisen haben und der Sinn der Bewegung stets derselbe ist, treffen wir bei den Kometenbahnen alle möglichen Neigungen an und auch die Bewegungsrichtung im verkehrten Sinne. In Folge dieses

Umstandes zeigen die Bewegungen wenig Gemeinschaftliches. Die Kometen werden in allen Theilen des Himmels aufgefunden, in der Ekliptik und am Pol, und sie durchwandern den Himmel in allen Richtungen. So wurde der heurige grosse Komet auf der Südhalbkugel Mitte Mai sichtbar und tauchte, mit immer wachsender Geschwindigkeit nach Norden eilend, am 22. Juni zum ersten Mal über dem Nordhorizont der nördlichen Halbkugel auf. Von da an verlangsamte sich die Geschwindigkeit, während gleichzeitig auch die Helligkeit abnahm. Hingegen nahmen die Bewegungen des grossen Kometen von 1874 einen geraden umgekehrten Verlauf.

Es ist für uns ein Leichtes, alle die Gesetze und Bewegungen auf das Einfachste zu beweisen und zu berechnen; aber es hat eines grossen Genies bedurft, um diese Gesetze zu finden. Ich will zum Schlusse noch kurz zeigen, wie es Kepler angestellt hat oder wie er es hätte anstellen können, um sein erstes Gesetz, dass sich die Planeten in einer Ellipse bewegen, zu finden.

Um die Sache zu vereinfachen, nehme ich an, dass sich die Erde in einem Kreise und in demselben gleichförmig bewege und der Planet, dessen Bahn ich untersuchen will, bewege sich genau so wie in der Natur in einer einem Kreise ähnlichen, aber doch verschiedenen Linie; ausserdem lägen die Bahnen in derselben Ebene. Ich werde, wie es Kepler gethan hat, jenen Planeten zur Untersuchung wählen, von dem zahlreiche Positionen vorliegen und dessen Bahn die grössten Unregelmässigkeiten zeigt, weil ich vermuthe, dass sich die Gattung der Curve bei diesem am leichtesten erkennen lassen wird. Ferner soll derselbe auch nicht gar zu weit von der Erde entfernt sein. Alle diese Bedingungen werden durch den Planeten Mars am besten erfüllt, weshalb ihn auch Kepler als Untersuchungsobject auswählte. In Figur 10 sei S die Sonne, der Kreis die Erdbahn, in welchem die Erde nach einander die verschiedenen

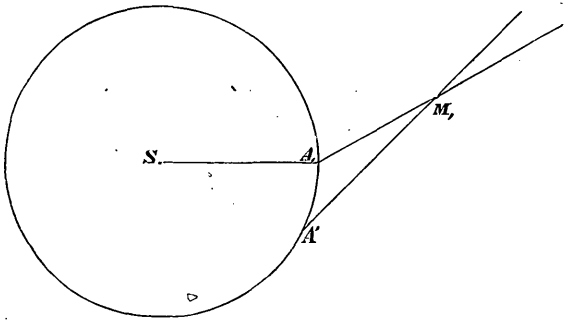
Fig. 10.



Stellungen A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 u. s. w. einnimmt. Die Winkel $A_1 S A_2$, $A_2 S A_3$ u. s. w. sind, wie ich bereits gezeigt habe, identisch mit den Bögen, welche die Sonne am Himmel zurückgelegt hat, also bekannte Grössen. Ebenso ergeben die Beobachtungen die Richtungen, in welchen der Mars von der Erde aus nach einander erscheint; es seien dies die Richtungen nach R_1, R_2, R_3,

R_4, R_5 u. s. w. Wäre mir nun die jedesmalige Distanz des Mars von der Erde bekannt, so brauchte ich nur diese Distanzen aufzutragen und durch eine Curve zu verbinden und dann zu untersuchen, was für eine Gestalt diese Curve hat. Die Distanz ist mir aber unbekannt und ich bin hiermit auf die erste Schwierigkeit gestossen. Ich setze voraus, die Umlaufszeit des Mars wäre mir genau bekannt — sie ist, wie ich früher erwähnt, 686·9798 Tage. — Unter dieser Annahme werde ich mir aus dem vorhan-

Fig. 11.



denen Beobachtungsmaterial eine Beobachtung heraussuchen, welche um 686·9798 Tage oder ein Vielfaches dieser Zahl früher angestellt wurde.

Zur Zeit dieser Beobachtung war der Mars in demselben Punkte seiner Bahn, nicht aber die Erde. Diese war in dem Punkte A' und auch der Mars wurde in der Richtung A' R' gesehen. Ich habe demnach zwei Beobachtungen des Mars angestellt von zwei verschiedenen Punkten der Erdbahn, welche sich auf denselben Punkt der Marsbahn beziehen. Der Planet muss daher in M' im Durchschnittspunkte von AR und $A'R'$ gestanden sein. Ich bin somit zur Kenntniss einer Marsdistanz gelangt. Ganz auf dieselbe Weise gelange ich zur Kenntniss der anderen Distanzen. Durch die Punkte M_1, M_2, M_3 u. s. w. ziehe ich eine Curve und finde bei der Vergleichung mit bekannten Curven, dass dieselbe eine Ellipse ist.

Dies ist in kurzen Umrissen der Weg, auf welchem Kepler zu seinem ersten Gesetze gelangte.

Ich habe bei meiner Entwicklung mehrere Voraussetzungen gemacht, deren Einfluss auf das geschilderte Verfahren ich jetzt noch erörtern will.

Eine Voraussetzung war, dass die Marsbahn in derselben Ebene wie die Erdbahn zu liegen kommt. Da das aber nicht der Fall ist, so erleidet das obige Verfahren eine Abänderung dahin, dass die Richtungen $A_1 R_1$, $A_2 R_2$ u. s. w. nicht in die Ebene des Papiers zu liegen kommen, sondern im Raume zu construiren sind. Es bedingt dies nur eine grössere Mehrarbeit, welche aber sonst keine Schwierigkeiten darbietet.

Eine andere Voraussetzung war die Kenntniss der Umlaufszeit. Auch hier steckt eine Schwierigkeit, denn es handelt sich darum, die Umlaufszeit zu finden, ohne Kenntniss der Distanzen. Wenn eine volle Anzahl Erdumläufe mit einer vollen Anzahl Marsumläufen zusammenfällt, so steht Mars von der Erde gesehen an demselben Jahrestage an derselben Stelle des Himmels; und umgekehrt schliesse ich wenn an demselben Jahrestage der Mars in derselben Stellung am Himmel erscheint wie vor einer bestimmten Anzahl von Jahren, dass eine volle Anzahl Marsumläufe stattgefunden hat. Das tritt zwischen Mars und Erde strenge nach 3,434.899 Jahren ein. Ich komme also auf diese Weise nicht zur Kenntniss der Umlaufszeit, ich muss einen andern Weg einschlagen. Die Marsbahn schliesst mit der Erdbahn einen Winkel von $1^0\ 51'$ ein. Wenn Sie sich die Ebene der Erdbahn verlängert denken, bis sie den Sternenhimmel trifft, so wird dort eine Linie markirt, welche wir Ekliptik nennen. Es ist dies dieselbe Linie, in welcher die Sonne ihre jährliche Bahn beschreibt. Wenn der Mars in jenem Theile seiner Bahn sich befindet, welcher über der Erdbahn liegt, so wird er von der Erde stets über der Ekliptik zu sehen sein, gleichgiltig wo sich die Erde befindet. Die verschiedenen Stellungen der Erde werden nur auf die Höhe über der Ekliptik Einfluss haben. Aehnliches ist der Fall, wenn sich der Mars in dem andern Theile seiner Bahn befindet. Ist er aber in einem der beiden Punkte, wo die Marsbahn die Erdbahn schneidet, so erscheint er in der Ekliptik, welche Stellung die Erde auch einnehmen mag. Diese beiden Punkte heissen die Knoten, der eine, bei dessen Passirung er von der Südseite der Ekliptik zur Nordseite steigt, der aufsteigende oder auch kurzweg Knoten, der andere der absteigende. Die Beobachtungen vor und nach Passirung des Knotens lassen somit auch entscheiden, ob der Mars seinen aufsteigenden oder absteigenden Knoten passirt. Ich habe jetzt nur nöthig zwei Beobachtungen herauszusuchen, bei welchen der

Mars in seinem auf- oder absteigenden Knoten war. Die Zwischenzeit schliesst dann eine volle Anzahl Umläufe ein, und es ist mir gelungen, ohne Kenntniss der Distanzen zur Kenntniss der Umlaufszeit zu gelangen. Endlich habe ich die Voraussetzung gemacht, dass die Erde in einem Kreise und gleichförmig sich bewege. Allein es würde mich dies zu weit führen und es möge Ihnen genügen, wenn ich sage, dass die Erdbahn sich wenig von einem Kreise unterscheidet, während die Abweichung der Marsbahn so bedeutend ist, dass diese falsche Hypothese nur geringen Einfluss ausübt.