Joh. Müller's Lehrbuch der kosmischen Physik

Müller, Johann Heinrich Jacob

Braunschweig, 1894

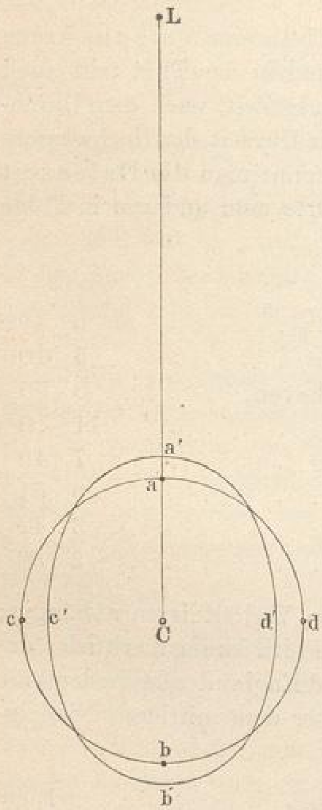
117. Mechanische Erklärung der Ebbe und Fluth

An kleinen mitten im Ocean liegenden Inseln ist die Fluth nicht bedeutend; so beträgt die Fluthhöhe auf St. Helena nur 0,3, auf den Inseln der Südsee nur 0,2 m.

Unter sonst gleichen Umständen nimmt die Fluthhöhe von dem Aequator nach den Polen hin ab; an der nördlichen Küste von Norwegen ist sie sehr unbedeutend.

117 **Mechanische Erklärung der Ebbe und Fluth.** Da alle Wirkungen im Planetensystem gegenseitig sind, so gravitirt nicht allein der Mond gegen die Erde, sondern auch die Erde gegen den Mond. Da aber nicht alle Punkte der Erdkugel in gleichem Abstande von dem Monde stehen, so sind sie auch ungleichen Anziehungskräften unterworfen und daraus eben entspringt die Ebbe und Fluth.

Fig. 169.



Wir wollen zunächst die Wirkung der anziehenden Kraft des Mondes auf das Meer unter der Voraussetzung betrachten, dass die Oberfläche des Wassers in jedem Augenblicke diejenige Form annimmt, welche durch die gemeinsame Anziehung des Mondes und der Erde bedingt wird; wir sehen also ab von allen Hindernissen, die sich der freien Bewegung des Wassers entgegenstellen können.

Es sei C der Mittelpunkt der Erde (Fig. 169), L der Mond, so wird der Punkt a der Erdoberfläche stärker vom Monde angezogen werden als C, und wenn a nicht fest mit C verbunden ist, so wird a mit grösserer Beschleunigung gegen L gravitiren als C, es wird sich ein Streben zeigen, a von C zu entfernen. Wenn sich also auf der dem Monde zugewandten Seite der Erde gerade ein grosser Ocean befindet, so wird hier das Niveau des Meeres steigen.

Ganz das Gleiche findet an der von dem Monde entferntesten Stelle b der Erdoberfläche statt. Hier in b wirkt die anziehende Kraft des Mondes geringer als in C, der Mittelpunkt der Erde gravitirt stärker gegen den Mond als b, und so wird sich auch bei den in der Nähe von b gelegenen Massen das Streben geltend machen, sich von dem Erdmittelpunkte zu entfernen.

Wäre die Erde ganz mit Wasser bedeckt, so würde die sonst kugelförmige Oberfläche derselben die Gestalt $a'c'b'd'$ annehmen; denn indem das Wasser bei a und b steigt, muss es nothwendig bei c und d sinken. Es würde also Fluth sein an den Orten, für welche der Mond im Meridian steht, sei es nun in oberer oder unterer Culmination, Ebbe aber an den Orten, für welche der Mond gerade auf- oder untergeht.

Bezeichnen wir mit d den Abstand des Erdmittelpunktes von dem Mittelpunkte des Mondes, so ist die Kraft, mit welcher die Masseneinheit in C vom Monde angezogen wird, $\frac{fm}{d^2}$, wenn m die Masse des Mondes ist. Die Kraft, mit welcher die Einheit der Masse in a vom Monde angezogen wird, ist aber $\frac{fm}{(d - r^2)}$, wenn r den Halbmesser der Erde bezeichnet; folglich ist die Differenz der Kräfte, welche in C und a wirken:

$$D = \frac{fm}{(d - r)^2} - \frac{fm}{d^2}.$$

Entwickelt man den ersten Theil dieses Werthes, indem man die Division von fm durch $(d - r)^2$ (also durch $d^2 - 2dr + r^2$) ausführt, so kommt:

$$\frac{fm}{(d - r)^2} = \frac{fm}{d^2} + \frac{2fmr}{d^3} + \frac{3fmr^2}{d^4} + \text{etc.},$$

und wenn man davon $\frac{fm}{d^2}$ abzieht, so bleibt:

$$D = \frac{2fmr}{d^3} + \frac{3fmr^2}{d^4} + \text{etc.}$$

Da der Werth von d sehr gross ist im Vergleich gegen r, so kann man ohne Weiteres alle Glieder dieser Reihe vernachlässigen, welche d^4 und höhere Potenzen von d im Divisor haben; es bleibt also:

$$D = \frac{2fmr}{d^3}.$$

Nun aber bewirkt die Sonne in ganz ähnlicher Weise Ebbe und Fluth, wie der Mond, nur sind die Sonnenfluthen wegen der grösseren Entfernung der Sonne weniger hoch als die Mondfluthen. Bezeichnen wir mit m' die Masse der Sonne, mit d' ihre Entfernung von der Erde, so haben wir also für die Kraft, welche die Sonnenfluth veranlasst:

$$D' = \frac{2fm'r}{d'^3}.$$

Nun aber ist $d' = 387d$ und $m' = 324439.81 . m$ (da die Masse des Mondes $^1/_{81}$ von der Erde beträgt) und danach ergiebt sich dann:

$$D' = \frac{2fr . m . 324439 . 81}{d^3 387^3} = 0{,}411\, D;$$

die Höhe der Sonnenfluthen ist also nahe $^2/_5$ so gross, als die Höhe der Mondfluthen. Da sich nun zur Zeit des Neu- und Vollmondes die Sonnen- und Mondfluthen summiren, so ist die Kraft, welche die Gesammtfluth veranlasst:

$$1 . 4\, D.$$

Zur Zeit der Quadraturen aber fällt die Mondfluth mit der Sonnenebbe zusammen, die Gesammtfluth erreicht alsdann die Höhe

$$D - 0,4\,D = 0,6\,D,$$

zur Zeit der Syzygien erreicht also die Fluth eine mehr als zweimal grössere Höhe, als zur Zeit des ersten und letzten Mondviertels. Diejenigen Fluthen, bei welchen die Wirkung der Sonne und des Mondes sich vollständig addiren, nennt man Springfluthen, diejenigen dagegen, bei welchen sich die Wirkungen am meisten gegenseitig aufheben, Nippfluthen oder taube Fluthen.

Wäre die ganze Erdoberfläche mit Wasser bedeckt, wäre ferner die Tiefe des Meeres überall gleich und fände die Bewegung des Wassers keinen Widerstand am Grunde des Meeres, so würde der Verlauf der Ebbe und Fluth ein sehr einfacher sein. Alle Punkte, welche auf demselben Meridian liegen, müssten zu gleicher Zeit Hochwasser haben; die Fluthwellen würden, von Nord nach Süd sich erstreckend, in der Richtung von Osten nach Westen fortschreiten, und zwar würde eine solche Fluthwelle den Weg um die ganze Erde in 24 Stunden zurücklegen, am Aequator also mit einer Geschwindigkeit von 225 geographischen Meilen in der Stunde fortschreiten müssen. — Ihre grösste Höhe müsste eine Fluthwelle an derjenigen Stelle eines Meridians erreichen, an welcher der Mond durch das Zenith geht.

In Folge der ungleichen Vertheilung von Wasser und Land, sowie des Widerstandes, welchen die Bewegung der Wellen durch den Meeresboden erfährt, wird das Phänomen der Ebbe und Fluth nicht unwesentlich verändert. Die Beobachtungen ergeben nämlich, dass das Hochwasser nicht zu der Zeit der Culmination des Mondes stattfindet, sondern später, und dass die Springfluthen sich zum Theil um mehrere Tage gegen den Eintritt des Neu- oder Vollmondes verspäten. So tritt z. B. bei Brest das höchste Wasser $1^1/_2$ Tage nach den Syzygien ein, und in der Nordsee ist die Verspätung eine noch weit grössere. Es ist dies eine Folge davon, dass die Geschwindigkeit der Wellen auf der Meeresoberfläche, welche durch die Anziehung des Mondes und der Sonne entstehen, von der Tiefe des Meeres und der Configuration der Festländer bedeutend beeinflusst wird.

Newton war der Erste, welcher das Phänomen der Gezeiten durch die Attraction des Mondes und der Sonne erklärte. Er machte die Voraussetzung, dass die ganze Erde vom Wasser bedeckt sei, dass die Erde dieselbe Dichtigkeit habe wie das Wasser, und dass die Oberfläche des Meeres in jedem Augenblicke diejenige Gestalt annähme, bei welcher es sich unter der anziehenden Kraft des Mondes, der Sonne und der Erde im Gleichgewicht befände. Dabei fand sich, was wir ebenfalls oben gefunden haben, dass die Kraft, mit welcher eine Masseneinheit des Wassers durch die Anziehung eines Gestirns vom Erdmittelpunkte entfernt wird, direct proportional der Masse des anziehenden Körpers und umgekehrt proportional dem Würfel seiner Entfernung vom Erdmittelpunkte ist. Da aber diese Entfernung sowohl bei der Sonne als auch beim Monde periodisch veränderlich ist, so ist auch die Fluthhöhe veränderlich und hat zwei Perioden, deren eine einen Mondmonat und die andere ein Jahr umfasst. Wir fanden für die Kraft, mit welcher der Mond den Punkt a (Fig. 169) vom Mittelpunkte C der Erde zu entfernen strebt, $D = \frac{2fmr}{d^3}$. In der Entfernung d zieht aber der Mond den Mittelpunkt der Erde mit einer Kraft $\varDelta$ zu sich, welche $= \frac{fm}{d^2}$ ist, und es ist demnach $\frac{D}{\varDelta} = \frac{2r}{d}$, d. h. es verhält sich die flutherzeugende Kraft des Mondes zu der Anziehung des Mondes gegen den Mittelpunkt der Erde, wie der Durchmesser der Erde zu der Entfernung des Mondes von der Erde. Ganz ebenso verhält sich die flutherzeugende Kraft der Sonne zu der Kraft, mit welcher die Erde von der Sonne angezogen wird, wie der Durchmesser der Erde zu der Entfernung der Erde von der Sonne. Da nun die Entfernung des Mondes von der Erde 30 mal und die der Sonne von der Erde 12 000 mal so gross ist, wie der Durchmesser der Erde, so ergiebt sich, dass der 30. Theil der Anziehung des Mondes, und der 12 000. Theil der Anziehung der Sonne auf die Bildung der Fluth wirkt. Da ferner die anziehende Kraft der Sonne gegen die Erde 160 mal so gross ist wie die des Mondes, so verhält sich die fluthbildende Kraft des Mondes zu derjenigen der Sonne wie 12 000 : 160 . 30 oder wie 10 : 4, sowie wir auch oben gefunden haben.

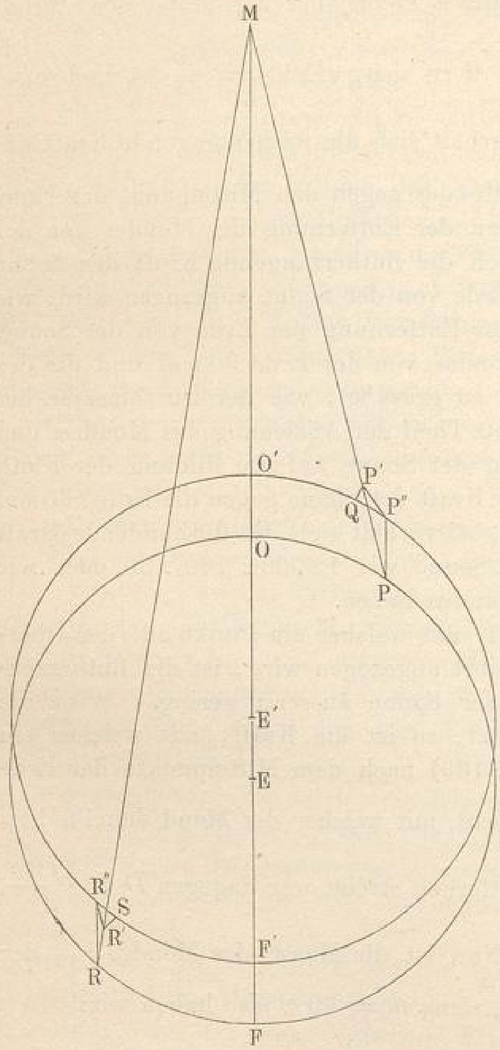
Im Verhältniss zu der Kraft, mit welcher ein Punkt auf der Oberfläche der Erde von der Erde selbst angezogen wird, ist die flutherzeugende Kraft des Mondes und der Sonne äusserst gering. Wird die Masse der Erde mit μ bezeichnet, so ist die Kraft, mit welcher ein Punkt a der Erdoberfläche (Fig. 169) nach dem Mittelpunkte der Erde gezogen wird, $\delta = \frac{f\mu}{r^2}$. Die Kraft, mit welcher der Mond den Punkt a vom Mittelpunkte der Erde zu entfernen strebt, war dagegen $D = \frac{2fmr}{d^3}$, und es ist also $\frac{D}{\delta} = \frac{2\,r^3 m}{\mu d^3}$. Nun ist die Masse des Mondes $^1/_{80}$ der Masse der Erde, und seine Entfernung $d = 60\,r$, also haben wir:

$$\frac{D}{\delta} = \frac{2}{60^3 . 80} = \frac{1}{8{,}6 \text{ Millionen}}.$$

Für die Sonne findet sich der entsprechende Werth $\frac{D'}{\delta} = \frac{2}{5} \cdot \frac{D}{\delta}$ $= \frac{1}{21{,}5 \text{ Millionen}}$. Befindet sich demnach der Mond im Zenith des Punktes a, so wird das Gewicht irgend eines in a befindlichen Gegenstandes durch die Einwirkung des Mondes um seinen neunmillionten Theil verringert; es ist dieses eine Gewichtsveränderung, welche selbst mit den schärfsten Instrumenten nicht direct nachgewiesen werden kann.

Wenn diese geringe flutherzeugende Kraft trotzdem im Meere Niveauunterschiede von sehr merkbarem Betrage hervorrufen kann, so liegt dies daran, dass wir hier die Gesammtwirkung auf eine sehr grosse Anzahl von Wassertheilen beobachten.

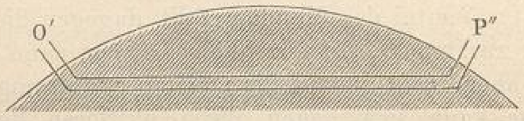
Fig. 170.



Es sei in E (Fig. 170) der Mittelpunkt der Erde, in M der Mittelpunkt des Mondes. In irgend einer Zeiteinheit wird E sich durch die Anziehung des Mondes nach E' bewegen. Ein Punkt P auf der Oberfläche des Meeres wird in derselben Zeiteinheit ebenfalls in der Richtung nach M fallen, und möge nach P' kommen, so dass $PP' > EE'$ ist. Wäre die Erde eine starre Masse, so würde P sich in derselben Zeit nicht nach P', sondern nach P'' bewegt haben, so dass PP'' gleich und parallel EE' wäre. Das Wassertheilchen P hat also das Bestreben, ausser der Bewegung, welche es in Folge der Bewegung des Erdmittelpunktes annimmt, sich noch von P'' nach P' zu bewegen. Die Kraft, welche das Theilchen zu bewegen strebt, wollen wir ihrer Grösse und Richtung nach durch die Linie $P'P''$ darstellen. Wir können uns dieselbe noch wieder in zwei Kräfte $P'Q$ und $P''Q$ zerlegt denken, von denen die eine $P'Q$ normal gegen die Oberfläche des Meeres wirkt, und bestrebt ist, das Gewicht des Wassertheilchens zu verringern, während die andere ($P''Q$) tangential gegen die Erdoberfläche wirkt, und dem Wassertheilchen eine seitliche Bewegung in der Richtung nach dem Punkte O' ertheilt, in welchem der Mond sich im Zenith befindet. Es lässt sich nun leicht zeigen, dass durch jede dieser beiden Kräfte eine Erhöhung der Wasserfläche entstehen muss, welche in O' ihr Maximum hat.

Denken wir uns eine Röhre, welche in O' und P'' (Fig. 170 und 171) aufwärts gebogen ist, deren übriger Theil sich aber unter der Wasseroberfläche befindet. Wir wollen zunächst annehmen, dass das Wasser in der Röhre unter dem alleinigen Einflusse der Erdanziehung im Gleichgewichte ist. Tritt dann eine Anziehung des Mondes M ein, den wir uns im Zenith von O' vorstellen, so wird diese Anziehung in O' stärker wirken als in P'', es wird also derselbe Fall eintreten, als wenn der nach O' gelegene Theil der Röhre mit einer leichteren Flüssigkeit gefüllt wäre, als der nach P'' gelegene. Das Wasser in der Röhre muss also bei O' höher steigen als bei P'', und zwar wird der Unterschied um so grösser sein, je länger die Röhre ist, d. h. je weiter O' von P'' entfernt ist, und sein Maximum dann erreichen, wenn für P'' der Mond im Horizont steht. Es hat aber, wie vorhin gezeigt ist, auch jedes Wassertheilchen in der Röhre das Bestreben, sich in der Richtung nach O' fortzubewegen; hierdurch wird ein Druck auf alle weiter vorn befindlichen Wassertheilchen ausgeübt, und in Folge dessen wird ebenfalls ein Steigen des Wassers in O'

Fig. 171.



und ein Fallen in P'' bewirkt. Man kann sich aber die um O' befindliche Wasserfläche als aus einer grossen Anzahl einzelner Röhren zusammengesetzt denken, und es folgt daraus, dass durch den Einfluss des Mondes das Wasser in O' um so höher steigen muss, je grösser die um O' befindliche Wasserfläche ist.

Dass auf der vom Monde abgekehrten Seite der Erde ähnliche Verhältnisse stattfinden, lässt sich gleichfalls leicht zeigen.

In der Zeit, während welcher der Erdmittelpunkt durch die Anziehung des Mondes von E nach E' fällt, würde, wenn die Erde starr wäre, ein Punkt R auf der Erdoberfläche sich nach R'' bewegen, so dass RR'' gleich und parallel EE' ist. Dagegen hat der Punkt R das Bestreben, sich während derselben Zeit in der Richtung RM nach dem Monde M zu bewegen, und zwar nach einem Punkte R' hin, der wegen der grösseren Entfernung von M näher bei R liegt, als E' von E. Ausser der Bewegung, welche der Punkt R in Folge des Fallens der Erde gegen den Mond erhält und welche ihn nach R'' bringen würde, hat er demnach noch das Bestreben, sich von R'' nach R' zu bewegen. Die Kraft, welche ihn dorthin zu bewegen strebt, können wir wieder in zwei Kräfte zerlegen, von denen die eine, die wir mit $R''S$ bezeichnen wollen, den Punkt nach F' hin bewegt, wo der Mond sich im Nadir befindet, während der andere ihn von dem Mittelpunkte E' der Erde zu entfernen strebt. Beide Wirkungen werden sich wieder vereinigen, um die Oberfläche des Wassers in der Nähe von F zu erhöhen, und zwar um so mehr, je ausgebreiteter die um F' befindliche Wassermasse ist.

Wäre die Erdoberfläche ganz vom Wasser bedeckt, und nähme sie in jedem Augenblicke die Gestalt an, welche die Anziehung der Erde selbst, sowie der Sonne und des Mondes ihr mitzutheilen streben, so würde die grösste Fluthhöhe im Meere den Betrag von nicht ganz einem Meter haben. In einem eingeschlossenen Meeresbecken von Dimensionen, welche gegen die Oberfläche der Erde sehr klein sind, würde aber die Fluthhöhe sehr viel geringer sein, und die Folge davon ist, dass man in solchen Meeresbecken, wie z. B. dem Caspischen, Schwarzen und selbst im Mittelländischen Meere, nur sehr geringe Spuren der Ebbe und Fluth wahrnimmt.

Es habe nun an irgend einem Punkte der Meeresoberfläche die Fluth, soweit sie von der Sonne allein hervorgebracht wird, eine Höhe von 20 cm, so wird die durch den Mond hervorgebrachte Fluth, da seine flutherzeugende Kraft, wie oben gezeigt, $2^1/_2$ mal so gross ist, als die der Sonne, eine Höhe von 50 cm haben. Zur Zeit der Syzygien (Neu- und Vollmond) werden die beiden genannten Fluthen zusammenfallen, ihre Gesammthöhe wird also 70 cm betragen. Zur Zeit der Quadraturen (erstes und letztes Viertel des Mondes) fällt dagegen die Mondfluth mit der Sonnenebbe zusammen, die Fluthhöhe beträgt dann also nur 30 cm. Der Mond hat aber nicht immer die gleiche Entfernung von der Erde, sondern dieselbe kann sich gegen ihren mittleren Betrag um ihren 18. Theil vergrössern oder verkleinern. Es ist aber oben gezeigt, dass die flutherzeugende Kraft umgekehrt proportional dem Cubus der Entfernung ist; setzen wir demnach die flutherzeugende Kraft des Mondes in seiner mittleren Entfernung $A = V$, in der Entfernung $A \pm \frac{1}{18} A = V'$, so ist

$$\frac{V}{V'} = \left(A \pm \frac{1}{18} A\right)^3 : A^3$$

$$= \left\{A\left(1 \pm \frac{1}{18}\right)\right\}^3 : A^3$$

$$= A^3\left(1 \pm \frac{1}{6} + \frac{3}{18^2} \pm \frac{1}{18^3}\right) : A^3$$

oder sehr nahe

$$= A^3\left(1 \pm \frac{1}{6}\right) : A^3,$$

also

$$V = V'\left(1 \pm \frac{1}{6}\right).$$

Es kann sich demnach die flutherzeugende Kraft des Mondes gegen ihren mittleren Betrag um ihren sechsten Theil vergrössern oder verringern, und da wir sie in unserem Beispiele im Mittel zu 50 cm annahmen, so kann sie zwischen 42 und 58 cm variiren. Die höchste Fluth würde hiernach den Betrag 78, die niedrigste 22 cm betragen.

Ebenfalls hat die verschiedene Entfernung der Sonne einen Einfluss auf die Fluthhöhe; da sie sich aber nur um ihren 60. Theil gegen den mittleren Betrag vergrössern oder verringern kann, so kann die fluth-erzeugende Kraft der Sonne sich nur um ihren 20. Theil verändern. Da wir die mittlere Sonnenfluth zu 20 cm annahmen, so kann demnach die höchste Springfluth bis auf 79, die niedrigste Nippfluth bis auf 21 cm kommen.

Wir haben bisher noch nicht untersucht, wie sich die Höhe einer Zenithfluth zu derjenigen der gleichzeitigen Nadirfluth verhält. Die flutherzeugende Kraft des Mondes in a (Fig. 169) fanden wir zu

$$\frac{2fmr}{d^3} + \frac{3fmr^2}{d^4} + \cdots$$

Wir wollen diese Kraft jetzt mit $D_{(a)}$ bezeichnen. Die flutherzeugende Kraft in b würde sich dagegen folgendermaassen ergeben:

$$D_{(b)} = \frac{2fmr}{d^3} - \frac{3fmr^2}{d^4} + \cdots$$

Es ergiebt sich also die Differenz zwischen den flutherzeugenden Kräften in a und b, wenn wir von höheren Potenzen von $\frac{1}{d}$ absehen,

$$D_{(a)} - D_{(b)} = 6\frac{fmr^2}{d^4}.$$

Nun war aber $D_{(a)}$ genähert $= \frac{2fmr}{d^3}$, und demnach, für unseren Zweck mit hinreichender Genauigkeit,

$$D_{(a)} - D_{(b)} = 3\frac{r}{d} \cdot D_{(a)}.$$

Für den Mond ist $\frac{r}{d} = \frac{1}{60}$, und da wir in unserem Beispiele $D_{(a)} = 50$ cm annahmen, so wird $D_{(a)} - D_{(b)} = 2{,}5$ cm, und also $D_{(b)} = 47{,}5$ cm.

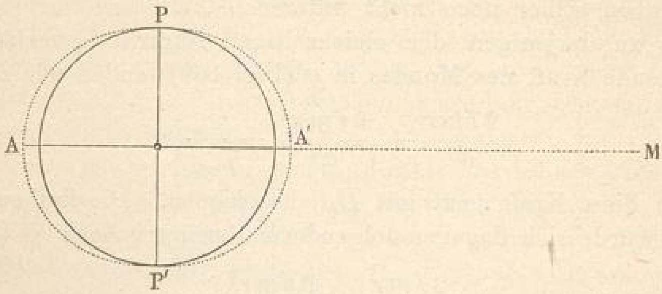
Mit Rücksicht hierauf kann demnach die niedrigste Nippfluth den Betrag von 18,5 cm haben. Bei der Sonne ist der Unterschied zwischen Zenith- und Nadirfluth völlig bedeutungslos, weil hier $\frac{r}{d}$ nur den Betrag von $\frac{1}{23000}$ hat, woraus sich in unserem Beispiel $D_{(a)} - D_{(b)}$ zu $^1/_{40}$ mm ergiebt.

Es lässt sich übrigens leicht sehen, dass für einen bestimmten Beobachtungsort die Höhe der Fluth auch von der geographischen Breite und der Declination des Mondes und der Sonne abhängig ist.

Nehmen wir zunächst an, dass sich das anziehende Gestirn M (Fig. 172, a. f. S.) in der Ebene des Aequators befindet, dann wird offenbar die höchste

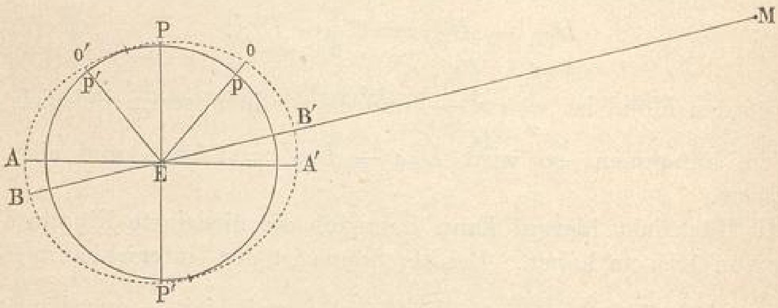
Fluth an denjenigen Punkten der Erdoberfläche stattfinden, welche sich auf dem Erdäquator AA' befinden; in höheren Breiten wird dagegen die Höhe der Fluth successive geringer und an den Polen P und P' wird sie völlig verschwinden. Es geht hieraus also hervor, dass die Fluthhöhe eine Function der geographischen Breite ist. Wenn aber der Mond sich nördlich oder südlich vom Aequator befindet (Fig. 173), so

Fig. 172.



wird die höchste Fluth nicht mehr unter dem Aequator AA', sondern in jedem Augenblicke an zwei Punkten B und B' stattfinden, von denen der eine den Mond im Zenith und der andere im Nadir hat; auch an den Polen P und P' wird jetzt ein kleiner Fluthwechsel stattfinden. In diesem Falle wird aber für jeden Ort, welcher sich nicht gerade auf dem Aequator oder einem der Pole befindet, die Höhe der Fluth eine verschiedene sein, je nachdem der Mond sich in der oberen oder unteren Culmination befindet. Es sei z. B. o (Fig. 173) ein Punkt der Meeres-

Fig. 173.

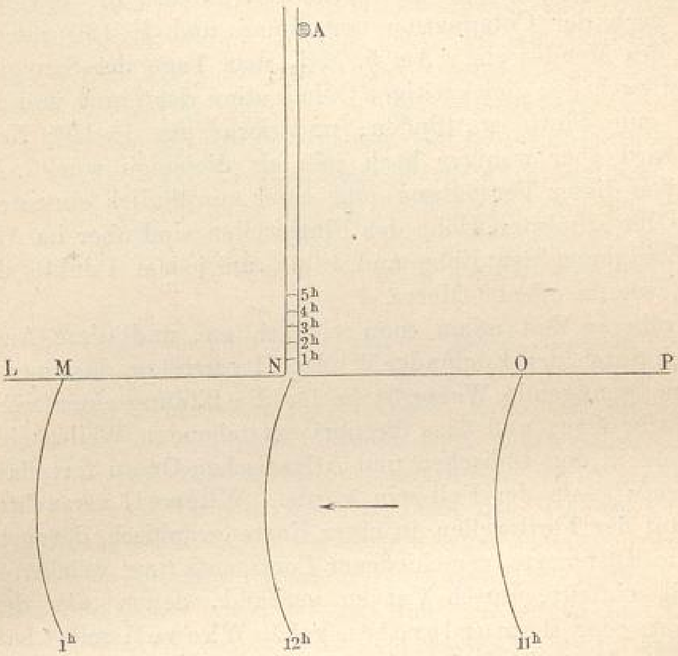


oberfläche, für den der Mond in oberer Culmination ist, so würde op den Betrag der Fluth bezeichnen. Nach 12 Stunden ist aber der Punkt, welcher vorher in o war, nach o' gekommen, wo der Mond in unterer Culmination ist, und es wird dann, wie die Figur sofort ergiebt, der Betrag $o'p'$ der Fluth geringer sein als op. Hierdurch entsteht die sogenannte tägliche Ungleichheit der Fluthhöhe, deren Betrag von der geographischen Breite des Beobachtungsortes und der Declination des anziehenden Gestirnes abhängig, übrigens immer sehr unbedeutend ist.

Bei Festhaltung der Zahlen unseres Beispieles beträgt der Unterschied zwischen den halbtäglichen Fluthen höchstens 2 bis 3 cm.

Wir haben bisher vorausgesetzt, dass die ganze Erdoberfläche in gleichmässiger Tiefe vom Meere bedeckt ist, und dass die Meeresoberfläche in jedem Augenblicke sofort die Gestalt annimmt, welche allein durch die anziehenden Kräfte bedingt wird. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse aber sehr verschieden von unserer Annahme, da nur zwei Drittheile der Erdoberfläche vom Wasser, und zwar in sehr verschiedener Tiefe bedeckt sind. Es ist ferner Rücksicht darauf zu nehmen, dass jede vorübergehende Erhöhung der Meeresfläche Wellenbewegungen hervorruft, und dass diese Bewegungen sowohl in ihrer Richtung als

Fig. 174.



auch in ihrer Grösse abhängig sind von der Tiefe der Wasserbecken, über welche sie hinstreichen, und von den Configurationen der Begrenzungen dieser Becken.

Es sei LP (Fig. 175) ein in der Richtung von Westen nach Osten sich erstreckendes Meeresufer, südlich davon sei Wasser, nördlich Land. Durch das Land erstrecke sich nach Norden hin ein Canal NA, in A sei ein Beobachtungsort für die Gezeiten, also ein Pegel, der regelmässig abgelesen wird. Wir wollen voraussetzen, dass an einem bestimmten Tage, z. B. dem 5. Mai, genau 12 Uhr Mittags, Neumond sei, und die Sonne und der Mond um dieselbe Zeit am Orte N culminiren. Nach unserer bisherigen Annahme, dass der Bewegung der Fluthwellen kein Hinderniss entgegenstehe, würde also das Hochwasser an diesem Tage bei N genau um 12^h Mittags stattfinden, während die Fluthwelle sich um 11^h bei O und um 1^h bei M befinden würde.

In dem Canal wird nun ebenfalls die Wellenbewegung fortschreiten, indessen wegen der Reibung, welche das Wasser an den Ufern erfährt, mit sehr verringerter Geschwindigkeit. Für jeden einzelnen Punkt des Canals, z. B. A, wird ebenso, wie im offenen Meere, täglich zweimal eine Fluth eintreten müssen, eine aufmerksame Beobachtung der Fluthhöhen wird aber zeigen, dass die Springfluthen später als die Syzygien eintreten. Wenn z. B. die Fluthwellen 51 Stunden gebrauchen, um von N nach A zu gelangen, so wird in unserem oben angenommenen Falle die Springfluth bei N am 5. Mai 12 Uhr Mittags, dagegen bei A erst am 7. Mai 3 Uhr Nachmittags stattfinden. An diesem Tage culminirt der Mond aber erst um $1^h\ 41^m$, und es tritt also die Springfluth drei Stunden nach der Culmination der Sonne und $1^h\ 19^m$ nach der Culmination des Mondes ein. Am 5. Mai, dem Tage des Syzygiums, wird zwar bald nach der gleichzeitigen Culmination der Sonne und des Mondes ebenfalls eine Fluth stattfinden, und zwar um $1^h\ 19^m$ Nachmittags, dieselbe wird aber weniger hoch sein als diejenige vom 7. Mai. Abgesehen von dieser Verspätung und einer gewöhnlich eintretenden Veränderung der absoluten Höhe der Fluthwellen sind aber im Allgemeinen die Erscheinungen der Ebbe und Fluth an jedem Punkte des Canals dieselben, wie im offenen Meere.

In früherer Zeit nahm man vielfach an, und diese Annahme ist namentlich durch den Engländer Whewell vertreten, dass nur der Grosse Ocean eine genügende Wasserfläche für die Bildung einer selbständigen Fluthwelle besässe, und dass die dort entstehenden Wellen sich in ähnlicher Weise in den Indischen und Atlantischen Ocean fortpflanzten, wie es in einem Canale der Fall sein würde. Whewell versuchte es auch, den Verlauf der Fluthwellen in einer Karte graphisch darzustellen, indem er die Küstenorte verschiedener Continente, an welchen die Fluth gleichzeitig eintritt, durch Curven verband, denen man den Namen Isorachien oder Homopleroten gab. Whewell selbst hat indessen später eingesehen, dass über den Verlauf der Fluthwellen im offenen Meere, da hier keine Fluthbeobachtungen angestellt werden können, eine völlige Ungewissheit herrscht, und dass daher die von ihm früher gezeichneten Isorachien keine reelle Bedeutung haben. In der That ist aber auch die Voraussetzung, von welcher Whewell ausging, wonach nur im Grossen Ocean sich eine selbständige Fluthwelle bilden könne, eine irrige. In kleineren eingeschlossenen Seen, wie z. B. dem Michigansee, ist deutlich ein Fluthwechsel, wenngleich von geringer Höhe, erkennbar, um so mehr muss sich in ausgebreiteten Meeren, wie dem Atlantischen Ocean, ein solcher ausbilden.

Sehr eigenthümliche Erscheinungen können eintreten, wenn die Wellen verschiedener Fluthsysteme zusammentreffen. Es können dann Interferenzerscheinungen entstehen, in Folge deren die Gezeiten ganz oder theilweise verschwinden, anderentheils aber können sich die Wirkungen der Gezeiten summiren, wodurch sie bedeutend vergrössert werden. Die grössten Höhen erreicht aber die Fluth in Buchten, in denen das Wasser sich staut und die eindringende Fluthwelle mit dem aus der Bucht zurückfliessenden Wasser zusammentrifft. Auf diese Weise entstehen die grössten Fluthen, welche auf der ganzen Erde beobachtet werden, wie z. B. in St. Malo, dem Bristol Canal und namentlich der Fundybai.

Einen wie grossen Einfluss die Tiefe und Weite der Meere auf die Geschwindigkeit der Fluthwellen hat, zeigt sich besonders deutlich an den Küsten Grossbritanniens. Eine vom Atlantischen Meere sich ostwärts bewegende Fluthwelle trennt sich südlich von Irland in drei Wellen, deren eine sich durch den Canal, die zweite durch die Irische See und die dritte westlich von Irland nach Norden bewegt. Nach sieben Stunden ist die erste bis Dover, die zweite bis zur Insel Man gelangt, während die dritte sich mit grosser Geschwindigkeit an der Nordspitze von Schottland vorbei bis östlich von den Orkney-Inseln fortbewegt hat. Diese letztere schreitet dann in der Richtung nach Süden mit abnehmender Geschwindigkeit durch die Nordsee vor, und gelangt nach weiteren 12 Stunden in die Gegend von Dover, wo sie mit einer Welle zusammentrifft, welche sieben Stunden vorher westlich in den Canal eingedrungen war.

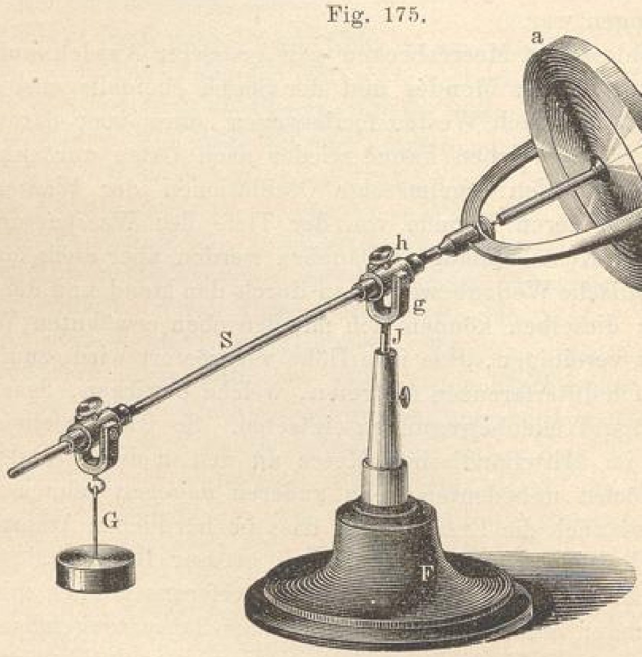
In eingeschlossenen Meeresbecken von grösserer Ausdehnung wird durch die Anziehung des Mondes und der Sonne ebenfalls eine Fluthwelle sich von Osten nach Westen fortbewegen, muss aber darauf, da sie westlich nicht entweichen kann, wieder nach Osten zurückkehren. Auf diese Weise werden regelmässige Oscillationen der Wasserfläche entstehen müssen, deren Periode von der Tiefe des Wassers und der Configuration der Küste abhängt. Daneben werden aber auch fortwährend neue periodische Wellenbewegungen durch den Mond und die Sonne hervorgebracht; dieselben können sich mit den eben erwähnten Wellensystemen derart vereinigen, dass ihre Höhe vergrössert wird, zum Theil können aber auch Interferenzen eintreten, welche bewirken, dass keine oder sehr geringe Wellenbewegungen eintreten. So ist es vielleicht zu erklären, dass im Mittelländischen Meere an den meisten Stellen der Fluthwechsel höchst unbedeutend, an anderen dagegen sehr merklich ist. Ferrel hat auch die Erscheinung, dass im nördlichen Atlantischen Ocean die Fluthwellen von ganz besonders grosser Höhe sind, durch ähnliche Ursachen erklären wollen. Durch Interferenz können mitunter auch die Wirkungen einzelner Componenten der flutherzeugenden Kraft aufgehoben werden. So ist z. B. bei Tahiti die Sonnenfluth grösser als die Mondfluth, wodurch bewirkt wird, dass der Fluthwechsel immer nahe zu denselben Tageszeiten eintritt; dieselbe Erscheinung findet sich bei Courtown an der östlichen Küste von Irland, und bei Tonkin findet täglich nur eine einmalige Fluth statt.

Bei Neu Guinea ist vorwiegend eine Sonnenfluth bemerkbar, welche eine sehr starke tägliche Ungleichheit hat, so dass zur Zeit der Springfluthen fast nur ein Hochwasser täglich bemerkbar wird. Die Mondfluth mit halbmonatlicher und ebenfalls starker täglicher Ungleichheit bewirkt eine kleine Veränderlichkeit in der Zeit und Höhe der Hauptfluth.

Aus Obigem geht hervor, dass das Phänomen der Gezeiten ein höchst complicirtes ist, und es wird wohl schwerlich jemals gelingen, eine nach allen Richtungen befriedigende Theorie über die Flutherscheinungen aufzustellen. Entgegen der Voraussetzung von Laplace, welcher in seinen grundlegenden Untersuchungen über die Bewegung der Fluthwellen die Annahme machte, dass die ganze Oberfläche der Erde vom Wasser bedeckt sei, hat Airy in seinen die Gezeiten behandelnden Arbeiten die Erscheinung der Ebbe und Fluth als eine Wellenbewegung in einem, die Erde in einem grössten Kreise umgebenden, verhältnissmässig engen Canal betrachtet. Weder diese noch die Vorausetzung, welche Laplace machte, entspricht im Allgemeinen der Wirklichkeit, und so ist es noch nicht gelungen, für irgend einen Ort die Hafenzeit theoretisch ohne Zuhülfenahme von Beobachtungen zu berechnen.

118 **Erklärung der Präcession.** Die Erscheinung der Präcession selbst haben wir bereits in §. 35 kennen gelernt; die mechanische Er-

Fig. 175.



klärung derselben ergiebt sich aus den Erscheinungen, welche in §. 74 des ersten Bandes des Lehrbuches der Physik (9. Aufl., S. 326) besprochen wurden. Zur Erläuterung der Präcessionserscheinung wollen wir aber zunächst noch ein Gyroskop von etwas veränderter Construction be-