

Die Rotationserscheinungen der Erde.

Von Prof. Dr. A. P r e y.

Vortrag, gehalten am 12. Jänner 1938.

Es ist aus der Schule bekannt, daß die Erde einen Nordpol und einen Südpol besitzt und daß sich die Erde um die Verbindungslinie dieser beiden als Achse dreht, und es ist ferner bekannt, daß diese Bewegung der Erde den Wechsel von Tag und Nacht zur Folge hat. Der Tag ist also nichts anderes als die Umdrehungszeit der Erde und man möchte meinen, daß damit alles gesagt sei, was wir von der Rotation der Erde wissen. Es soll nun gezeigt werden, daß das nicht so ist, sondern daß bei dieser Drehung der Erde noch eine ganze Menge von Dingen zu beachten ist, daß wir aus diesen scheinbar kleinen Dingen manches über die Konstitution der Erdrinde und des Erdinneren herausbekommen und daß wir auch zeigen können, daß die Umdrehungszeit der Erde nicht immer die gleiche gewesen ist.

Bevor wir aber zu einer eingehenderen Besprechung übergehen, müssen wir ein paar Begriffe aus der Mechanik erläutern, die für das folgende grundlegend sind. Zunächst wollen wir festhalten, daß wir nur eine Bewegung um eine Achse betrachten wollen, die durch den Schwerpunkt geht. Eine jede an-

dere Achse würde eine Verlagerung des Schwerpunktes mit sich bringen, die wir mit einer Verschiebung des ganzen Körpers ohne Drehung indentifizieren können, während wir alle übrigen Bewegungen als Drehung um den Schwerpunkt betrachten. Legen wir also eine solche Achse durch den Schwerpunkt eines beliebigen Körpers, bilden für jeden Punkt das Produkt aus seiner Entfernung von der Drehungsachse und dem zugehörigen Massenelement und summieren über den ganzen Körper, so erhalten wir ein „Trägheitsmoment“. Es ist klar, daß wir verschiedene Trägheitsmomente erhalten, wenn wir für verschiedene Achsen rechnen. Wenn wir also alle Trägheitsmomente für alle möglichen Achsenrichtungen bilden, so wird eines von diesen das größte sein müssen. Bei einfach gestalteten Körpern, etwa bei einer flachen Scheibe, wird man sofort sehen, welche Achse das größte Trägheitsmoment geben wird. Die Mechanik lehrt uns, daß bei der Rotation um diese Achse diese selbst gar keinen Zug erfährt. Sie wird sich also in ihrer Richtung erhalten können und heißt eine freie Achse. Läßt man aber die Achse irgendwie schief gehen, so entstehen sofort Kräfte, die an der Achse reißen. Eine solche Achse kann dann nicht mehr als freie Achse bestehen. Die Erde kann ihrer äußeren Form nach zunächst näherungsweise als eine Kugel betrachtet werden. Aber schon seit mehreren Jahrhunderten weiß man, daß die Erde keine genaue Kugel ist, sondern eine Abplattung

besitzt. Die erste Beobachtung, in der sich die Abplattung geltend machte, machte der französische Astronom Richer 1671, als er zur Bestimmung der Sonnenparallaxe nach Cajenne geschickt wurde. Er machte die Entdeckung, daß er das Sekundenpendel seiner Uhr um $\frac{5}{4}$ Linien verkürzen mußte. Während Newton auf Grund seines um diese Zeit gefundenen Gravitationsgesetzes sofort die richtige Erklärung geben konnte und die Verkleinerung der Schwere am Äquator auf die Abplattung zurückführte, hielten die Franzosen noch lange Zeit an der Auffassung fest, daß die Erde ein verlängertes Rotationsellipsoid sei, weil sich dieses aus ihren Gradmessungen zu ergeben schien. Die französische Gradmessung, die damals die Ausdehnung von Frankreich in der Richtung Nord—Süd umfaßte, war aber zu ungenau, um den Unterschied hervortreten zu lassen. Andererseits war es klar; wenn die Erde abgeplattet ist, so sind die Punkte des Äquators weiter von dem Erdmittelpunkt oder sozusagen von der gesamten Masse der Erde entfernt und haben daher kleinere Schwere als die Punkte in der Nähe des Pols. Ein Pendel schwingt unter dem Einfluß kleinerer Schwere zu langsam und muß daher verkürzt werden. Durch die großen Gradmessungen des 18. Jahrhunderts in Peru und Lappland wurde die Frage zugunsten der Newton'schen Auffassung entschieden und seither etwa wissen wir, daß die Erde eine Abplattung von $\frac{1}{300}$ besitzt, was nichts anderes heißt, als daß die

Polarachse um 42 km kürzer ist als der Äquator-durchmesser.

Die Newton'sche Auffassung führt die Abplattung auf die Eigenschaften der Flüssigkeiten zurück, und da die Erde in ihrem Urzustand wahrscheinlich flüssig gewesen ist, so schien es naheliegend anzunehmen, daß sie damals schon ihre heutige Figur angenommen hat. Damit aber kommen wir offenbar in einen Widerspruch. Wahrscheinlich hat, wie wir später sehen werden, die Erde zur Zeit, als sie flüssig war, eine ganz andere Rotationszeit gehabt und hätte also eine ganz andere Abplattung annehmen müssen. Sonst müßten wir annehmen, daß die Erde seit dieser Zeit ihre Massenlagerung gar nicht geändert hat. Jede Massenumlagerung ändert nämlich die Rotationsgeschwindigkeit, denn es ist der wichtigste Grundsatz der Mechanik rotierender Körper, daß eine gewisse Größe, das „Rotationsmoment“, immer konstant bleibt. Dieses hat die Form: Trägheitsmoment mal Rotationsgeschwindigkeit. Wenn sich also infolge von Massenverlagerung das Trägheitsmoment ändert, so muß sich auch die Rotationsgeschwindigkeit ändern. Nun ist es aber ganz sicher, daß sich die Massenlagerung in der Erde geändert hat; den Beweis dafür bringt das Vorhandensein der geologischen Schichten. Wie käme es also, daß wir trotzdem eine Abplattung finden, die der heutigen Rotation entspricht. Wir können nichts anderes annehmen, als daß die Erde auch heute nicht ganz

fest und auch heute in der Lage ist, sich den Rotationsverhältnissen anzupassen. Es ist dies eine Annahme, welche ganz dem entspricht, was wir heute von den Massen wissen, nämlich, daß unter dem Einfluß lange dauernder Kräfte jede Masse zu fließen anfängt, daß also jede Masse unter dem Einfluß solcher Kräfte sich schließlich wie eine Flüssigkeit, wenn auch eine zähe Flüssigkeit, benimmt.

Die Beobachtung hat gezeigt, daß die Erdachse doch nicht genau durch den Pol des Rotationsellipsoides geht, sondern eine Abweichung zeigt, die allerdings sehr klein ist, nämlich nur den Betrag von zirka 0.5'' oder etwa 15 Meter erreicht. Die Linie, um die sich die Erde dreht, bestimmt den augenblicklichen Pol, und senkrecht dazu liegt der augenblickliche Äquator. Die Theorie lehrt uns nun, daß dieser Polpunkt wandert und einen kleinen Kreis beschreibt, so daß er bald diesseits, bald jenseits von dessen Mittelpunkt liegt. Dem entsprechend verlagert sich auch der Äquator und damit ändert sich die geographische Breite, allerdings nur um sehr kleine Beträge, mit einer Periode, die der Umlaufzeit des Poles um den Kreismittelpunkt entspricht. Die Theorie verlangt nun unter der Voraussetzung, daß die Erde ein fester Körper wäre, eine Periode von 304 mittleren Tagen. Wir beobachten nun eine ziemlich komplizierte Polbahn mit einer Periode von einem Jahr, aber daneben noch eine Periode mit wechselnder Dauer von etwa 420

bis 440 Tagen, die als Chandler'sche Periode bezeichnet wird, dagegen zeigt sich von der Periode von 304 Tagen keine Spur.

Die jährliche Periode erklärt sich unschwer aus meteorologischen Erscheinungen. Der Umstand zum Beispiel, daß sich im Winter in Zentralsibirien ein hoher Luftdruck ausbildet, der etwa 20 mm über dem normalen ist und dem auf der amerikanischen Seite nichts so Wesentliches gegenübersteht, bedeutet eine einseitige Belastung der Erde. Es ist klar, daß die Achse auf diese im Zeitraum eines Jahres immer wiederkehrenden Stöße mit einer Schwingung von der Periode eines Jahres antworten muß. Von der anderen Periode hat Newcomb gezeigt, daß sie nichts anderes ist als die verlängerte Euler'sche Periode, und die Ursache der Verlängerung ist die Elastizität der Erde. Man kann aus dieser Verlängerung auf die Elastizität der Erde schließen. Hough findet sie zu $8'98 \cdot 10^{11}$. Das ist etwas mehr als die Festigkeit des Stahles. Herglotz findet unter besseren Voraussetzungen $11'68 \cdot 10^{11}$.

Die Geologie hat festgestellt, daß der Pol nicht immer an der Stelle gelegen hat, wo er heute liegt. Wir finden Vereisung dort, wo sie heute nach der geographischen Breite nicht möglich wäre, und andererseits finden wir die Reste einer tropischen Vegetation dort, wo heute Schnee und Eis liegt. Es muß also der Pol gewandert sein. Unsere heutigen Beobachtungen geben uns darüber keine Andeutun-

gen. Heute scheint der Pol festzuliegen oder sich so langsam zu bewegen, daß bis jetzt noch nichts bemerkt wurde. Früher scheint das anders gewesen zu sein. Der Umstand, daß die oberste Kruste der Erde, die sichtbaren Gebirge und Länder, jedenfalls sehr fest sind und nicht gleich so fließen, wie etwa das Erdinnere, muß die Erde immer wieder aus dem Gleichgewicht bringen, sobald auf derselben größere Massenverschiebungen eintreten. Dadurch wird der Pol zu wandern beginnen und solange weiter wandern, bis wieder ein Gleichgewichtszustand gefunden ist.

Wir haben bisher nur den einfachen Fall betrachtet, daß die Erde ganz allein ist, daß also auf sie keine äußeren Kräfte wirken. Das ist aber offenbar nicht der Fall in der Natur. Es ist zunächst der Mond, der wegen seiner Nähe außerordentlich stark wirkt und dann die Sonne, die zwar 400mal weiter ist, wegen ihrer etwa $2\frac{1}{2}$ Millionen mal größeren Masse doch einen Einfluß von derselben Größenordnung wie der Mond ausübt. Die Erscheinung, die Sonne und Mond verursachen, ist die sogenannte Präzession. Sie rührt davon her, daß die Erde abgeplattet ist und daß die Äquatorebene mit der Ebene der Sonnenbahn oder auch mit der nicht viel anders liegenden Mondbahn einen Winkel von $23'5^{\circ}$ bildet, den wir bekanntlich die Schiefe der Ekliptik heißen. Wegen der Abplattung geht die vom Mond ausgeübte Anziehung nicht durch den Mittelpunkt der

Erde. Daraus folgt ein Drehmoment, welches die Achse aufzurichten versucht. Nun aber treten die aus der Physik bekannten Kreiselerscheinungen auf. Die Achse setzt dem Aufrichten einen Widerstand entgegen; statt sich aufzurichten, weicht sie nach der Seite aus, und die Folge davon ist, daß die Achse einen Kegel beschreibt. In ganz der gleichen Weise wirkt auch die Sonne, und beide zusammen bewirken, daß dieser Kegel in der Zeit von 26.000 Jahren beschrieben wird. Wenn sich nun die Erdachse in dieser Weise bewegt, so wandert auch der Äquator und mit dem Äquator der Frühlingspunkt, der nichts anderes ist, als der Schnittpunkt des Äquators mit der Ekliptik, die bei dieser Erscheinung im wesentlichen fest bleibt, und zwar beträgt die Verschiebung im Jahr $51''$. Wenn also die Erde ihren Umlauf um die Sonne macht, findet sie den Frühlingspunkt immer ein Stück früher, weil er ihr entgegen kommt. Man könnte meinen, daß aus diesem Grunde der Jahresanfang schließlich in alle Jahreszeiten kommen müßte. Der Kalender ist aber schon so eingerichtet, daß das nicht der Fall ist. Wir rechnen das Jahr von einem Durchgang der Sonne durch den Frühlingspunkt bis zum nächsten, das ist also etwas kürzer als die wahre Umlaufszeit und wird als tropisches Jahr bezeichnet. Es hat $365'2422$ Tage. Dieses Jahr legen wir dem Kalender zugrunde. Nun muß aber ein Kalenderjahr eine ganze Zahl von Tagen enthalten. Wir können nicht sagen, das Jahr

beginnt einmal um 3 Uhr nachmittags oder ein andermal um 7 Uhr früh. Damit wir aber mit dem Jahresbruchteil zurechtkommen, führt man Schalttage ein, und da das Jahr im wesentlichen um sechs Stunden länger ist als 365 Tage, macht man alle vier Jahre einen Schalttag. Das ist aber nicht genau genug. Die Schaltregel, die Gregor XIII. 1582 eingeführt hat, setzt fest, daß alle ganzen Jahrhunderte keine Schalttage haben, nur die durch vier teilbaren Jahrhunderte behalten ihn. Damit haben wir eine Schaltregel derart, daß der Mittelwert aller Kalenderjahre so genau mit 365'2422 Tagen zusammenfällt, daß erst in 3000 Jahren ein Fehler von einem Tag entsteht. Damit ist erreicht, daß der Frühlingsanfang immer auf den 21. März fällt. Daß aber der Frühlingshimmel dabei immer andere Gestirne zeigen wird, ist für diese Frage ganz gleichgültig. In der Tat äußert sich die Präzession sehr deutlich in dem Anblick des Himmels. So war zum Beispiel der Frühlingspunkt im Altertum im Sternbild des Widlers gelegen und ist jetzt bis in die Fische zurückgerückt; er wird nach 13.000 Jahren im Stier stehen. Auch unser Polarstern wird sich noch einige Zeit dem Pol nähern, dann sich aber immer weiter entfernen und es werden alle Sterne der Reihe nach Polarsterne werden, welche auf dem Kreis liegen, den der Pol am Himmel beschreibt. So wird nach etwa 13.000 Jahren Wega, einer der schönsten Sterne unseres Himmels, als Polarstern gelten dürfen. Der

Himmel wird dann also so aussehen, als ob wir die Erdachse samt der Erde und allem was darauf ist, um $2 \times 23'5'' = 47''$ gedreht hätten. Daraus folgt, daß am Südhimmel Gestirne auftauchen, die wir heute in unseren Breiten überhaupt nicht sehen können, zum Beispiel das berühmte Sternbild des südlichen Kreuzes, dagegen wird der Orion, der jetzt unseren Winterhimmel ziert, verschwunden sein.

Mit der Erscheinung der Präzession ist auch die Nutation verbunden. Diese rührt nur davon her, daß die Kraft, welche die Präzession erzeugt, nicht konstant ist. Die Sonne ist zu gewissen Zeiten der Erde näher als zu anderen Zeiten, ebenso der Mond. Die Mondbahn ist gegen die Ekliptik etwas (zirka $5''$) geneigt und überdies ist die Bahn nicht fest, sondern die Schnittlinie mit der Ekliptik wandert in zirka 18'6 Jahren einmal herum. Der Mond wirkt also zu Zeiten so, als ob die Schiefe $23'' + 5''$, und zu anderen Zeiten $23'' - 5''$ wäre. Alle diese Einflüsse äußern sich in der Präzession, und wir fassen alle diese kleinen Glieder, von denen die größten eine Periode von 18'6 Jahren haben, unter dem Namen Nutation zusammen. Sie haben zur Folge, daß der Präzessionskreis sich in eine flache Wellenlinie verwandelt.

Wir haben noch eine Erscheinung zu besprechen, welche für die Rotationserscheinungen der Erde wichtig ist, nämlich den Einfluß der sogenannten Flutreibung. Sie gehört in dasselbe Gebiet wie die

Erscheinung von Ebbe und Flut des Wassers. Diese wird bekanntlich durch den Mond und die Sonne hervorgerufen. Wir können uns die Entstehung dieser Erscheinung in der Weise vorstellen, daß immer die vordersten Punkte der Wasserfläche (in der Richtung auf den Mond) am stärksten angezogen werden, die hintersten am schwächsten. Es bleiben also die hinteren Punkte gegenüber den vorderen zurück, so daß die Erde auseinandergezogen wird, und wir haben sowohl auf der Vorderseite als auch der Hinterseite einen Flutberg; damit erklärt sich die bekannte Erscheinung, daß wir täglich zweimal Flut und täglich zweimal Ebbe haben. Nun hat sich aber herausgestellt, daß nicht nur das Wasser, sondern auch die feste Erde unter dem Einfluß der Anziehung des Mondes eine Flutbewegung macht. Dies läßt sich zum Beispiel folgendermaßen erkennen: Wenn die Erdkruste selbst so beweglich wäre wie das Wasser, so müßte sie der Flutkraft ebenso stark folgen. Es würde dann die Küste eine gleiche Bewegung machen, wie das Wasser und an einem Flutmesser würde man überhaupt keine Bewegung bemerken; wäre die Erdkruste dagegen ganz fest, so würde die ganze Flutbewegung des Wassers an einem Flutmesser gemessen werden können. In der Tat ist ein Mittelzustand vorhanden, es kommt nur ein Teil der Flut zum Ausdruck, sie wird durch die Nachgiebigkeit der Erde auf zirka $\frac{3}{4}$ reduziert. Die Wasserbewegung ist nun nicht gut zu beobachten,

aber es gibt ein Instrument, welche dieselbe Größe viel genauer beobachten läßt, das ist das Horizontalpendel, das etwa so wirkt, wie eine in einer schiefen Angel aufgehängte Tür. Die geringste Verschiebung der Achse macht sich dann in einem sehr großen Ausschlag bemerkbar. Dieses Instrument zeigt uns nun, daß die feste Erdoberfläche unter dem Äquator täglich um zirka 30—40 cm auf- und abschwankt. Wenn man diese Größe zusammenhält mit dem Einfluß der Elastizität auf die Länge der Chandler'schen Periode, so haben wir jetzt zwei Erscheinungen, die von der Elastizität abhängig sind und wir können daraus zwei Konstanzen bestimmen. Man kann also versuchen außer einem Mittelwert auch noch die Änderung mit der Tiefe zu bestimmen. Es zeigt sich aber, daß auf diesem Wege nichts Rechtes herauskommt, weil sich die beiden Größen, auf die es ankommt, sozusagen parallel ändern, oder mit anderen Worten, nicht unabhängig voneinander sind, daher zur Bestimmung von zwei Größen nicht ausreichen. Man kommt also erst zu einem Resultat, wenn man eine dritte Größe dazu nimmt. Diese liefert die Untersuchung der Erdbebenwellen, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch von der Elastizität der Erde abhängig ist. Wenn man nun annimmt, daß die Festigkeit bis zum Mittelpunkt immer zunimmt, so findet man ihren Wert in der Form $16 \cdot 10^{11}$ ($1 - 0'83 r^2$), so daß die Erde im Mittelpunkt doppelt so fest ist wie der Stahl. Für die Oberfläche

finden wir $2'7 \cdot 10^{11}$. Die Beobachtung der Erdbebenwellen scheinen aber darauf hinzudeuten, daß die Festigkeit im Mittelpunkt geringer ist, also die Masse sich dort mehr wie eine Flüssigkeit benimmt, da sie keine Transversalwellen durchzulassen scheint. Wenn man also die Annahme macht, daß die Festigkeit von oben nach unten anfänglich steigt, aber dann gegen den Mittelpunkt auf 0 abnimmt, so erhält man $60 \cdot 10^{11} r^2$ ($1 - 0'95 r^2$). Hier tritt das Maximum mit etwa $15'8 \cdot 10^{11}$ in einer Tiefe von 1750 km ein.

Wir können nicht annehmen, daß sich diese Flutbewegung ohne innere Reibung abspielt. Wir müssen also die Erde wie eine zähe Flüssigkeit behandeln; dann müssen wir aber auch annehmen, daß der Flutberg nicht momentan entsteht, und nicht an der Stelle, wo ihn die Mondstellung verlangt, sondern er kommt sozusagen immer zu spät. Bis also der Flutberg entsteht, ist er bereits unter dem Monde weggelaufen. Dieser sucht nun den Flutberg zurückzuziehen. Da er aber infolge der Reibung zu fest an der Erde haftet, wirkt dies als ein Drehmoment auf den Erdkörper selbst, dessen Rotationsgeschwindigkeit dadurch gebremst wird. Andererseits sucht der Flutberg den Mond hinter sich her-zuziehen. Dadurch wird dieser geschwinder und sein Rotationsmoment größer. Nun haben wir aber den allgemeinen mechanischen Grundsatz aufgestellt, daß in einem System, in welchem nur gegenseitige Kräfte vorkommen, das Rotationsmoment konstant bleiben

muß. In der Tat wird also während das Rotationsmoment des Mondes größer wird, das der Erde ebensoviel kleiner werden. Mit seinem größeren Rotationsmoment muß der Mond sich von der Erde entfernen und eine größere Bahn beschreiben. Die Folge ist also eine langsamere Drehung der Erde und eine größere Entfernung des Mondes. Es ist klar, daß die Erde auch umgekehrt auf dem Mond eine Flut erzeugen müßte und auf diesem Wege die Mondrotation gebremst wird. Diese Kraft hat sozusagen schon ausgetobt. Der Mond hat seine Rotation vollständig verloren und zeigt uns nun immer die gleiche Seite. In der Tat ist der Mond in der Richtung zur Erde etwas verlängert. Das ist der festgewordene Flutberg, der nur noch wenig um eine Mittellage pendelt (Libration).

Darwin hat den ganzen Vorgang numerisch verfolgt und gezeigt, daß der Anfangszustand derart ist, daß der Mond mit seiner Oberfläche fast die Erde berührt, und darauf gründet sich die Hypothese, daß sich der Mond einmal von der Erde losgelöst hat, und zwar soll das große Becken des Pazifischen Ozeans seine Geburtsstätte sein. Damals haben beide, Mond und Erde, die gleiche Umlaufs- und Umdrehungszeit gehabt, und zwar von etwa fünf Stunden. Die Flutreibung hat nun die Erdrotation verlangsamt und den Mond weiter hinausgetrieben, wobei seine Umlaufszeit größer geworden ist, so daß jetzt 27 unserer heutigen Tage auf einen Umlauf des

Mondes kommen. Das wird sich noch verstärken, bis 29 Tage auf einen Monat kommen. Gleichzeitig wird aber die Erde immer langsamer rotieren, bis sie dem Monde nur mehr die gleiche Seite zuwendet. Der Tag wird dann auf 55 heutige Tage gewachsen sein. Der ganze Prozeß ist also ein Austausch des Rotationsmomentes, welches von der Erde auf den Mond übergeht. Dabei wird eine gewisse Menge von Energie durch die innere Reibung vernichtet. Darwin hat hierfür eine innere Reibung in dem festen Erdkörper selbst angenommen. Neuere Untersuchungen haben aber gezeigt, daß der ganze Energieverlust, der dabei in Frage kommt, durch die Verhältnisse in den seichten Meeren herbeigeführt wird, also doch durch das Wasser, und daß daher die innere Reibung im festen Körper überhaupt nicht mehr in Frage kommt; das heißt nichts anderes, als daß sich die Erde den Flutkräften gegenüber wie ein vollständig elastischer Körper benimmt, bei welchen mit dem Aufhören der Kraft immer wieder genau der gleiche Zustand zurückkehrt. Es gibt viele Körper, welche sich gegenüber kurz wirkenden Kräften wie elastische Körper verhalten, dagegen gegen langwirkende Kräfte wie eine zähe Flüssigkeit; z. B. Kolophonium. Für die Verhältnisse der Erde scheint nun die Flutperiode noch als kurz zu gelten. Um so mehr benimmt sich die Erde gegenüber den Erdbebenwellen, die sehr kurze Perioden haben, als vollkommen elastisch. Wir fragen nun, ob wir von diesem Lang-

samerwerden der Erdrotation etwas merken. Dies ist in der Tat der Fall. Wenn der Tag länger geworden ist, ohne daß wir es wissen, so ist eigentlich mehr Zeit verflossen, als wir glauben, und das hat zur Folge, daß die Sonne, die Planeten und der Mond in ihren Bahnen schon weiter voraus sind, als wenn die Tage gleich geblieben wären. Es folgt daraus eine scheinbare Beschleunigung der Gestirne, die bei dem Monde, der sich am raschesten bewegt, am deutlichsten hervortritt. Diese Beschleunigung beträgt für den Mond 9'' im Jahrhundert. Diese Größe gibt nun die Grundlage, nach der man die Zeit berechnen kann, die der Mond gebraucht hat, um von der Erde soweit wegzukommen. Die Zeit, die vergangen ist, seit der Mond 240.000 km von der Erde entfernt war, ist etwa vier Milliarden Jahre, während die Zeit vom Anfang bis zu dieser Distanz nur zu $\frac{1}{20}$ dieser Zeit berechnet wird. Der Einfluß der Flutreibung geht mit der sechsten Potenz der Entfernung und war daher, als der Mond noch sehr nahe war, viel größer. Die Erde benimmt sich also wie eine Uhr, die zurückbleibt, aber nicht um einem konstanten Betrag täglich, sondern um einen stetig wachsenden Betrag. Wenn dieser also im Jahrhundert 9'' beträgt, so sind es nach zwei Jahrhunderten nicht 18'', sondern 36'' usw. Darum kann man diesen Betrag am besten aus den Beobachtungen des Altertums bestimmen, die zwar sehr ungenau sind, die aber doch ausreichen, weil der Betrag schon entsprechend groß geworden

ist. Es sind namentlich die antiken Mondesfinsternisse, die uns dabei helfen.

Abgesehen von diesen kleinen Beträgen erschien uns die Erde bisher als die allerbeste Uhr und man richtete alle Uhren nach den Gestirnen, was nichts anderes heißt, als nach der Erdrotation. Heute haben wir Uhren, zum Beispiel die, die auf den Schwingungen der Moleküle in Quarzkristallen beruhen, die doch noch genauer sind als die Erde, so daß man auf diesem Wege der Erde schon auf kleine Unregelmäßigkeiten gekommen ist.

Mit der Gezeitenbewegung, welche sich auch im festen Erdkörper bemerkbar macht, hat man noch eine Erscheinung in Zusammenhang gebracht, nämlich die sogenannte Kontinentalwanderung. Es hat Wegener gezeigt, daß die Ostküste von Amerika und die Westküste von Europa—Afrika merkwürdig aneinanderpassen, so daß, wenn man Amerika zurückdreht, sich die Küsten genau aneinanderschließen. Wegener hält es also für möglich, daß sich Amerika von Europa—Afrika einmal losgerissen, also sozusagen davongeschwommen ist und sucht dies durch zahlreiche Beobachtungen aus Geologie und Botanik zu stützen. Es ist kein Zweifel, daß man durch solches Zusammenrücken der Kontinente in der Vorzeit eine Fülle von Rätseln, welche die Geologie bietet, vernünftig lösen kann, so zum Beispiel ist das Zusammenschieben von Südafrika mit der Antarktis,

Australien und Indien eine gute Erklärung für die auf diesen Kontinenten gleichzeitig auftretenden Eiszeiten, wobei man nur noch annehmen muß, daß damals der Pol in diesen Komplex hineingefallen ist. Endlich scheinen die geographischen Längenbestimmungen von Grönland und Madagaskar tatsächlich eine recht bedeutende Änderung der geographischen Länge zu zeigen. Es tritt die Frage auf, ob solche Bewegungen denkbar sind und sich durch physikalische Vorgänge erklären lassen. Dazu ist zunächst zu bemerken, daß man sich heute die Kontinente tatsächlich wie eine Art schwimmender Platten vorstellt, die ihrem Gewichte entsprechend 30 bis 50 km in eine tiefere und dichtere Masse eintauchen, der eine gewisse Plastizität zukommt. Wenn man aber bedenkt, welchen ungeheuren Widerstand diese Stirnflächen einer seitlichen Bewegung entgegenzusetzen, so muß man fragen, wo die Kräfte dazu herkommen. Man hat zuerst an die sogenannte Polfluchtkraft geglaubt, die darin besteht, daß die Kontinente, die etwas aus der Unterlage herausragen, infolge der vergrößerten Fliehkraft gegen den Äquator streben. Im Zusammenhang damit, daß der Äquator nicht immer an der gleichen Stelle lag, bekäme man Bewegungen nach allen Richtungen. Es läßt sich aber zeigen, daß diese Polfluchtkraft so klein ist, daß man nicht einmal ihre Richtung verbürgen kann und daß sie überhaupt infolge kleiner Verdrehungen der Kontinente ganz verschwindet.

Andererseits zeigt die Theorie der Gezeiten, daß von dem Monde ein ständiger Zug nach Westen ausgeübt wird. Doch scheint es nicht möglich, daß diese Kraft den großen Widerstand überwindet. Dagegen wäre es denkbar, daß die ganze Erdkruste samt den Kontinenten nach Westen drängt, am Äquator am stärksten, gegen die Pole weniger und weniger. Es schwimmen also die Kontinente nicht so wie Schiffe, die das Wasser durchschneiden, sondern wie Eisberge, die mit der Strömung wandern. Ein Auseintreten der Kontinente kann nur entstehen, wenn ein Kontinent auseinanderreißt, und ein Teil infolge irgend eines Hindernisses stehen bleibt. Es kommt also nur die Differenz solcher Erscheinungen zum Ausdruck. Wenn man annimmt, daß in früheren Zeiten der Erdgeschichte, die Erde einen größeren Grad von Plastizität hatte, so kommt man auf diesem Wege tatsächlich auf sehr große Verschiebungen. Ob heute auch noch solche Verschiebungen möglich sind, ist vorläufig nicht zu entscheiden. Die zahlreichen Beobachtungen von geographischen Koordinaten auf der Erde haben bisher, abgesehen von wenigen Ausnahmen, nichts gezeigt. Namentlich die Breite wird seit vielen Jahren sehr genau untersucht und hat keine Veränderung erkennen lassen. Andererseits wäre es sehr sonderbar, wenn die Breite ganz konstant bliebe und sich nur die Länge änderte. Auch die Störungen, welche ziemlich sicher in Grönland nachgewiesen sind, müssen nicht den ganzen

Kontinent betreffen, sondern können schließlich von einer Schollenbewegung herrühren.

Es gibt noch andere Theorien, die Kontinentalwanderung zu erklären, so die Theorie der Unterströmungen, bei welcher durch das strömende Magma unter den Kontinenten diese gewissermaßen mitgerissen oder etwa durch den Rückstoß zurückgestoßen würden. Die Frage, welche Theorie die richtige ist, ist wohl heute noch nicht zu beantworten. Wahrscheinlich wirken alle diese Ursachen zusammen. Da nun die Kontinentalwanderung auch die Polwanderung zur Folge haben soll, so haftet auch dieser die gleiche Unsicherheit an.

Wir sehen also, daß aus der Erdrotation eine Fülle von schwierigen Problemen herauswachsen. Wenn die Geologie mit immer wachsender Sicherheit verlangt, daß die Kontinente einmal gewandert sind, und daß auch die Pole immer andere Positionen angenommen haben, so muß natürlich die Geophysik einmal den Urgrund herausfinden können. Die Schwierigkeit liegt in der Hauptsache darin, daß die Erde ungeheure Dimensionen hat und in ihrem Inneren ungeheure Drucke und Temperaturen herrschen, die wir im Laboratorium nicht nachmachen können. Daraus folgt, daß wir die Tatsachen, die wir im Laboratorium finden, ins ungewisse erweitern müssen, wir heißen dies extrapolieren, und das ist eine sehr gefährliche Sache. Ich bin der Überzeugung, daß viele Mißerfolge gerade davon kom-

men, daß wir das, was wir im Laboratorium gefunden haben, auf die Erde nicht anwenden dürfen. Gewisse kleine Einflüsse, die im Laboratorium gar keine Rolle spielen, werden für die Erde sehr groß und gerade diese scheinen der Grund zu sein, warum es auf der Erde anders zugeht, als wir auf Grund der im Laboratorium gefundenen physikalischen Gesetze glauben müßten.