

Paper-ID: VGI_198407



Expandiert die Erde?

Kurt Bretterbauer ¹

¹ *Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Techn. Universität Wien,
Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **72** (3), S.
81–93

1984

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Bretterbauer_VGI_198407,  
  Title = {Expandiert die Erde?},  
  Author = {Bretterbauer, Kurt},  
  Journal = {{\0}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen und  
    Photogrammetrie},  
  Pages = {81--93},  
  Number = {3},  
  Year = {1984},  
  Volume = {72}  
}
```



Expandiert die Erde?

Von Kurt Bretterbauer, Wien

Zusammenfassung

Die Geodäsie als Wissenschaft zielt über die Ausmessung der Erdgestalt hinaus und sucht eine Deutung des gegenwärtigen Zustandes. Deshalb wird eine vereinfachte Darstellung des komplexen Problems der Expansion der Erde gegeben.

Abstract

Geodesy as a science aims beyond measuring the figure of the Earth, and tries an interpretation of its present state. Therefore, a simplified presentation of the complex problem of Earth-expansion is given.

1. Einführung

Die im Titel formulierte Frage wird seit mehr als einem halben Jahrhundert in der geowissenschaftlichen Literatur gestellt (*Lindemann, 1927; Hilgenberger, 1933; Keindl, 1940*). Auslösender Anlaß war die Theorie der Kontinentalverschiebung von *A. Wegener (1915)*, weil eine Expansion eine zwanglose Erklärung für diese liefert. Die Diskussion des Problems erreichte in den Jahren 1955 – 1975 einen vorläufigen Höhepunkt in den Arbeiten prominenter Fachleute aus verschiedenen Disziplinen. In erster Linie sind hier der ungarische Geophysiker *L. Egyed (1963, 1969)*, der Hamburger Physiker *P. Jordan (1966)* und der australische Geologe *S. W. Carey (1976)* zu nennen. Diese Experten hielten die Expansion der Erde praktisch für erwiesen und konnten eine Vielzahl von Argumenten anführen. Man kann sich der großen Suggestivkraft dieser Argumente nur schwer entziehen. Denn die Expansionstheorie vermag viele bisher zusammenhanglos dastehende Tatsachen der Geowissenschaften von einem einheitlichen Standpunkt aus zu deuten.

Das Problem muß auch jeden naturwissenschaftlich denkenden Geodäten interessieren, auch wenn eine Expansion vermessungstechnisch nie merkbar werden würde; dazu ist sie viel zu gering, wenn überhaupt existent. Zwei Gründe lassen sich für das geforderte Interesse anführen. Erstens muß die Geodäsie, soll sie eine anspruchsvolle Wissenschaft sein, von der schon weitgehend erreichten Beherrschung der Wirklichkeit zur Deutung der Wirklichkeit übergeben. Das bedeutet, daß sich die Geodäsie auch mit der Entwicklungsgeschichte der Erde befassen sollte. Zweitens könnte die Geodäsie in Zukunft berufen sein, einen Beitrag zur Lösung dieser wichtigen Frage zu leisten, und damit zwischen konkurrierenden Theorien zu entscheiden. Eine definitive Klärung der gestellten Frage würde unser Weltbild ganz wesentlich beeinflussen.

Der Geodät ist gewohnt, nur gelten zu lassen, was meßbar, oder mathematisch beweisbar ist. Deshalb sind Meinungsstreite in der geodätischen Literatur selten. Studiert man als Geodät die zahlreichen Publikationen zum Expansionsproblem, ist man überrascht, wie widersprüchlich Expertenaussagen sein können, und zuletzt weiß man nicht, was mehr zu bewundern ist: Die Kühnheit der Gedankengänge, oder die fanatische Selbstsicherheit mit der diese von ihren Autoren angepriesen werden. Viele Autoren schießen in ihrem Eifer über das Ziel hinaus und verabsäumen zu prüfen, ob ihre Ergebnisse mit anderen Tatsachen verträglich

sind. Hier kann sich eine Tugend der Geodäten bewähren: Sie sind Anhänger keiner Hypothese und können daher Fakten unbestechlich und leidenschaftslos analysieren, ohne sich deshalb ein Urteil in fachfremden Gebieten anzumaßen. Wie dies gemeint ist, soll weiter unten an einem Beispiel deutlich gemacht werden.

In den letzten Jahren mehren sich die Gegner der Expansionstheorie, sie scheint aus der Mode zu kommen, ohne daß eine definitive Antwort gefunden wurde. Es ist aber durchaus möglich, daß sie schon morgen wieder hoch aktuell wird.

Im folgenden wird eine keineswegs erschöpfende und aus Platzmangel auch sehr vereinfachte Darstellung der möglichen Ursachen und Folgen einer Expansion der Erde gegeben sowie jener Argumente, die dafür oder dagegen sprechen.

2. Mögliche Ursachen und Wirkungen einer Expansion

In den Anfängen der Theorie wurde ein Massenzuwachs der Erde durch Energieabsorption angenommen (*Hilgenberger, l.c.*), oder eine radioaktiv bedingte thermische Ausdehnung des Erdkerns und damit verbundene Phasenänderungen des chemischen Materials (*Lindemann, Keindl, l.c.*). Heute kommen wohl nur kosmologische Gründe in Betracht. Die allermeisten Astrophysiker und Kosmologen stimmen in der Ansicht überein, daß das Weltall expandiert. Ein Maß für die Expansionsrate des Universums gibt die sogen. *Hubble-Konstante* H (für Details muß auf die astronomische Fachliteratur verwiesen werden, z.B.: *Unsöld, 1967; Voigt, 1975; Meurers, 1984*). Angaben über die *Hubble-Konstante* schwanken zwischen 50 und 100 km/s/Megaparsec. Hier wird der bei *Unsöld* und *Meurers* genannte Wert benützt:

$$H = 75 \text{ km/s/Mpc} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}. \quad (2.1)$$

Der Kehrwert stellt das Weltalter t dar, besser das Alter des gegenwärtigen Zustands der Welt:

$$t = 13 \cdot 10^9 \text{ Jahre}. \quad (2.2)$$

Die Expansionsrate des Radius des Weltalls ist gegeben durch:

$$\dot{R}/R = H. \quad (2.3)$$

(Der Punkt bezeichnet wie üblich die Ableitung nach der Zeit).

Man kann nun im Rahmen einer Maßtheorie der Gravitation (*Wesson, 1980, S. 71*) folgern, daß die Expansion des Universums mit einer Expansion der in die Raum-Zeit-Welt eingebetteten Körper und deren Bahnradien gekoppelt ist. Überträgt man (2.3.) auf den Erdradius, setzt also $\dot{r}_E/r_E = H$, so folgt für die Gegenwart mit $r_E = 6371 \text{ km}$:

$$\dot{r}_E = + 0,5 \text{ mm/Jahr} \quad (2.4)$$

und für den Mondbahnradius (Mittelwert $a_M = 384.000 \text{ km}$):

$$\dot{a}_M = + 3 \text{ cm/Jahr}. \quad (2.5)$$

Diese Vorstellung ist mit der *Einstein*schen Relativitätstheorie verträglich, die unter anderem voraussetzt, daß die physikalischen Gesetze und deren fundamentale Konstanten in Raum und Zeit unveränderlich sind (= starke Form des Äquivalenzprinzips). Eine dieser Konstanten ist die Gravitationskonstante G als das Verhältnis von schwerer und träger Masse. Das Postulat der Identität von schwerer und träger Masse (= schwache Form des Äquivalenzprinzips) ist

der Ausgangspunkt der allgemeinen Relativitätstheorie. Dem entgegen steht die Ansicht des großen österreichischen Physikers und Philosophen *E. Mach* (1901), der eine Abhängigkeit der trägen Masse vom Zustand des Universums behauptet (*Machsches Prinzip*). Demnach wären die Trägheitskräfte von der Anwesenheit der Materie des gesamten Weltalls abhängig und nur eine Wechselwirkung der einzelnen Körper mit ihr (*Westphal*, 1970, S. 28; *Walter*, 1976). Glaubt man also an eine Änderung des Zustandes des Universums, muß man auch eine Änderung der trägen Massen und damit von *G* anerkennen. Diese überzeugende Deutung ist zwar sehr umstritten, dennoch Grundlage mehrerer kosmologischer Theorien (vgl. *Wesson*, *I.c.*).

Von diesen Theorien soll hier nur die „Hypothese der großen Zahlen“ von *Dirac* (1937, 1974) im Prinzip erläutert werden, weil diese zumeist als Ursache der Expansion herangezogen wird. Die Zahlenwerte der früher erwähnten fundamentalen Konstanten, dazu gehören die Lichtgeschwindigkeit, die Gravitationskonstante, das *Plancksche* Wirkungsquantum, die elektrische Elementarladung, die Ruhmassen von Proton und Elektron, die *Hubble*-Konstante und die mittlere Dichte des Universums, hängen von unserem willkürlich gewählten Maßsystem ab. Von dieser Willkür kann man sich befreien, indem man bestimmte dimensionslose Verhältniszahlen bildet, deren Werte offenbar die Eigenschaften unserer Welt bestimmen. Diese Verhältniszahlen sind (*Meurers, I.c., S. 297; Unsöld, I.c., S. 316*):

$$\frac{\text{Elektrostatische Kraft zwischen Proton und Elektron}}{\text{Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron}} = \gamma$$

$$\frac{\text{Radius des Universums}}{\text{Elektronenradius}} \sim \gamma, \quad \gamma = 2,3 \cdot 10^{39}, \tag{2.6}$$

$$\frac{\text{Masse des Universums}}{\text{Masse des Protons}} \sim \gamma^2.$$

Die auffällige Übereinstimmung der drei Verhältnisse verlangte eine Erklärung. *Einstein* war der Meinung, das erste Verhältnis sei konstant, die beiden anderen ändern sich mit der Zeit, und die gegenwärtige Übereinstimmung sei Zufall. Diese Argumentation ist nicht befriedigend und hat *Dirac* veranlaßt zu postulieren, daß die beiden ersten Verhältnisse zu allen Zeiten gleich sein müssen! Er hat damit *G* an das Weltalter gebunden: Da das Alter zunimmt, muß *G* abnehmen. Die Abnahme ist wieder durch die *Hubble*-Konstante gegeben:

$$\dot{G}/G = -H = -7,7 \cdot 10^{-11} / \text{Jahr}. \tag{2.7}$$

(Gegenwärtig ist $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$).

Die himmelsmechanische Konsequenz aus der *Diracschen* Kosmologie ist die Zunahme der Bahnradien a_i der Planeten und Monde. Es gilt: $G \cdot a_i = \text{const.}$ Setzt man $G = \kappa/t$ ($t = \text{Zeit}$), so folgt $a_i = \text{const.} \cdot t/\kappa$, also wächst a_i mit der Zeit, und zwar gemäß

$$\dot{a}_i/a_i = -\dot{G}/G = H. \tag{2.8}$$

Für die Änderung des Mondbahnradius folgt somit wieder der Wert (2.5). Interessant sind die Konsequenzen für die Entwicklung des Planetensystems. Als der Zeitparameter t klein war, gehörten nach *Dirac* alle Planetenmassen zur Sonne. Man kann aus seiner Theorie die ganze Entwicklung des Sonnensystems herleiten.

Für die Änderung des Erdradius liegen die Verhältnisse etwas anders. Die Himmelskörper expandieren jetzt infolge der Druckentlastung, und je nachdem welches Druck-Dichte-Gesetz eingeführt wird, erhält man Expansionsraten der Erde von

$$\dot{r}_E = + 0,1 \text{ bis } 1,0 \text{ mm/Jahr.} \quad (2.9)$$

Auf eine Variante der *Dirac*-Theorie, die eine stetige Neuschöpfung von Masse vorsieht, kann hier nicht eingegangen werden (*Wesson, l.c.*).

Eine wichtige Folge der Expansion der Erde ist die säkulare Verlangsamung ihrer Rotation, d. h. die Tageslänge wäre in der Vergangenheit kürzer gewesen. Die Verlangsamung folgt aus dem Gesetz von der Erhaltung des Drehimpulses:

$$C \cdot \omega = \text{const.}, \quad \omega = 2\pi/T, \quad (2.10)$$

(C = Trägheitsmoment um die Rotationsachse, ω = Winkelgeschwindigkeit, T = Rotationsdauer. C wird hier für eine homogene Kugel genommen: $C = 2M_E r_E^2/5$; M_E = Erdmasse. Eine strengere Betrachtung müßte die Dichteverteilung berücksichtigen. Damit errechnet sich die Änderung der Rotationsdauer zu:

$$\dot{T}_E = + 1,3 \text{ ms/Jahrhundert.} \quad (2.11)$$

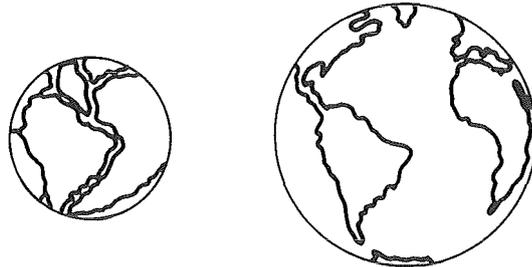
Durch Integration der entsprechenden Formeln kann man nun die Werte verschiedener interessanter Größen in die Vergangenheit zurückrechnen. Dies geschieht in der Tabelle 1 bis $4,5 \cdot 10^9$ Jahre vor der Gegenwart, dem möglichen Beginn der selbständigen Existenz der Erde. Dabei wird konstante Erdmasse von $M_E = 5,975 \cdot 10^{24}$ kg vorausgesetzt.

t Jahre	G $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	a_M km	r_E km	ρ_E g/cm^3	g_E cm/s^2	T_E Stunden
$0 \cdot 10^9$	$6,67 \cdot 10^{-11}$	384.000	6371	5,52	982	23,93
0,5	6,93	369.497	6130	6,19	1102	22,16
1	7,20	355.542	5899	6,95	1237	20,52
2	7,78	329.192	5462	8,75	1559	17,59
3	8,40	304.796	5057	11,03	1964	15,08
4	9,08	282.207	4682	13,90	2474	12,93
4,5	9,43	271.549	4505	15,60	2776	11,97

Tabelle 1: Werte der Gravitationskonstanten G , des mittleren Mondbahnradius a_M , des Erdradius r_E , der mittleren Dichte der Erde ρ_E , der Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche g_E und der Rotationsdauer der Erde T_E für die Vergangenheit t in Milliarden Jahren.

3. Empirische Argumente pro und contra Erdexpansion

Viele Erscheinungen auf der Erde gehen zweifellos auf Dehnungsvorgänge in der Erdkruste zurück, so z. B. die tektonischen Gräben, wie das Oberrheintal, die großen ostafrikanischen Grabensysteme, und die gewaltigen Zerreißspalten in den Ozeanen (Bülow, 1963, S. 37; Jordan, l.c., S. 24). Bekanntlich lassen sich die Umrisse der Kontinentalschollen auf einer kleineren Erdkugel zu einem einzigen Kontinent zusammenfügen (Figur 1). Da außerdem die

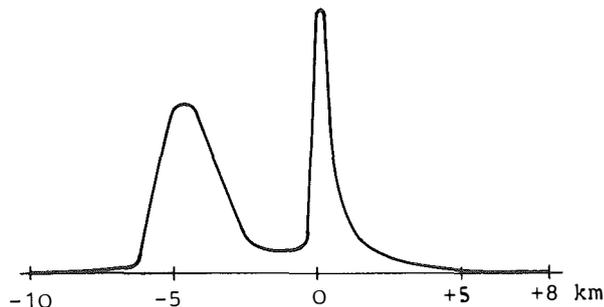


Figur 1: Uerde und Erde der Gegenwart

Meeresböden jung, die Kontinente dagegen alt sind, ist die Vorstellung verlockend, die feste Sialkruste der Kontinente hätte einst die ganze Erde umspannt, und wäre erst durch die Expansion in die heutigen Teile zerrissen worden. Demnach wäre die Oberfläche der Uerde nach Ausbildung der festen Kruste vor rund $4 \cdot 10^9$ Jahren (= Alter der ältesten Gesteine; Lauterbach, 1975, S. 43) gleich der Fläche der heutigen Kontinentalschollen von rund $150 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ gewesen. Der Radius der Uerde war also $r_E^0 = 3455 \text{ km}$ und seine Änderungsrate betrüge bei linearer Ausdehnung:

$$\dot{r}_E = + 0,7 \text{ mm/Jahr}, \tag{3.1}$$

eine verblüffende Übereinstimmung mit (2.4) und (2.9). Eine Stütze findet dieses Argument in der sogen. "hypsometrischen Kurve" (vgl. Egyed, 1969, S. 43). Zeichnet man die Häufigkeitsverteilung der Höhen und Tiefen der festen Erdkruste in ein Diagramm, so wird man bei statistischer Verteilung eine Gaußsche Glockenkurve mit nur einem Maximum erwarten. Die tatsächliche Kurve (Figur 2) zeigt zwei Maxima, eines bei $+ 0,1 \text{ km}$, das andere bei $-4,6 \text{ km}$. Es gibt



Figur 2: Hypsometrische Kurve

also zwei bevorzugte Niveaus auf der Erde. Die Unterstützung des vorigen Arguments der Erdexpansion ergibt sich aus einem Vergleich: Auf einem mit Eisschollen bedeckten See gibt es auch zwei bevorzugte Niveaus, die Eisoberfläche und die Wasseroberfläche. Die erste entspricht der Sialkruste, die zweite dem Sima, in dem die Kontinentalschollen schwimmen.

Gegen einen Radius der Urerde von 3455 km spricht ein schwerwiegender Einwand. Ihre mittlere Dichte hätte dann $34,6 \text{ g/cm}^3$ betragen müssen, ein kaum vorstellbar hoher Wert. Der in Tabelle 1 ausgewiesene Wert für die Dichte der Urerde von 15,6 dagegen ist sehr plausibel, liegt er doch noch unter der heutigen Dichte des Erdkerns (rund 17 g/cm^3 ; vgl. *Egyed, 1969, S. 197*). Es ist also durchaus denkbar, daß durch Expansion und Druckentlastung die chemischen Substanzen eine solche Differenzierung und Phasenumwandlung erfahren haben, die zu der heutigen Dichteverteilung führte. Allerdings muß man zu bedenken geben, daß eine Expansion eine adiabatische Abkühlung bedingt, sodaß es ganz unerklärlich wäre, wieso die Erde in nur 100 km Tiefe eine Temperatur von 1500°C und im Zentrum von mehr als 3000°C hat. Dem halten die Expansionisten entgegen, gerade die Abkühlung habe ein Aufheizen der Erde durch radioaktive Prozesse verhindert.

Die Verteilung von Land und Wasser in den geologischen Epochen wird durch paläogeographische Karten dargestellt. Solche wurden unabhängig von *Strachow* und *Termier* (vgl. *Egyed, l.c., S. 275*) geschaffen. Die Ausmessung der Landflächen ergibt eine stetige Abnahme der überfluteten Gebiete seit Anfang des Kambriums ($600 \cdot 10^6$ Jahre zurück) von $75 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ bei *Strachow* und von $55 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ bei *Termier*. Die Wassermenge auf Erden hat seither sicher nicht ab-, sondern eher zugenommen durch Bildung juvenilen Wassers. Die Verringerung der überfluteten Flächen erfordert daher eine Vergrößerung der Meeresbecken, also eine Volumenzunahme der Erde. Einer Oberflächenvergrößerung von im Mittel $65 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ in $600 \cdot 10^6$ Jahren entspricht eine Expansionsrate von abermals

$$\dot{r}_E = + 0,7 \text{ mm/Jahr.} \quad (3.2)$$

Es gibt weiters eine Reihe von Untersuchungen über die Schwerkraft in der Vergangenheit (*Stewart, 1970*). Als Indikatoren werden dabei zahlreiche Phänomene herangezogen, die in Zusammenhang mit der Schwerkraft stehen, wie: Tiefe von Gletscherschrammen, Neigung von Schrägschichten, Verdichtung von Sedimenten, Verdichtung von Tonen unter erratischen Blöcken, Skelettfestigkeit von Landtieren, Eindrucktiefe von Fußspuren, die Masse fliegender Tiere, u. a. Solche Untersuchungen sind eher qualitativer denn quantitativer Natur, zeigen aber dennoch, daß die Schwere in den letzten $0,5 - 1,0 \cdot 10^9$ Jahren nicht wesentlich verschieden vom heutigen Wert gewesen sein kann. Nach Tabelle 1 war die Schwere vor $1 \cdot 10^9$ Jahren um 25% größer, was sicher nicht als wesentlich verschieden gelten kann. In solchen Untersuchungen wird stillschweigend die Konstanz der Erdmasse vorausgesetzt. Schließt man, wie hier geschehen, kosmologische Gründe für eine Massenänderung aus, so ist die Annahme gerechtfertigt. Zwar erfährt die Erde einen ständigen Massenzuwachs aus dem Weltall durch Meteoriten in der Größenordnung von $20 \cdot 10^6$ Tonnen/Jahr, doch ist dies in diesem Zusammenhang unerheblich.

Der Paläomagnetismus scheint kein sehr geeignetes Mittel zum Nachweis einer Expansion der Erde zu sein. Immerhin läßt sich damit eine Expansionsrate von mehr als $2,5 \text{ mm/Jahr}$ mit 95% Vertrauenswahrscheinlichkeit ausschließen (*Hospers und van Andel, 1970*). Damit können Expansionsraten von $0,7 \text{ mm/Jahr}$ nicht widerlegt werden.

Carey (l.c.) hat in seinem inhaltsreichen Buch eine große Zahl empirischer „Beweise“ für die Expansion zusammengetragen. Er konzentriert sich dabei vor allem auf lokale und regionale tektonische Vorgänge, die zu speziell sind, um hier behandelt zu werden. Er kommt zu dem Schluß, daß die Erde während ihrer ganzen Entwicklungsgeschichte expandiert hat. Die Expansion vollzieht sich mit wachsender Geschwindigkeit, möglicherweise nach einem Exponentialgesetz, und soll in den letzten $100 \cdot 10^6$ Jahren rund 8 mm/Jahr betragen haben. Dies ist

ein unannehmbar großer Wert. *Carey* (l.c. S. 444) berechnet mit seinem Wert auch die jährliche Schwereänderung zu

$$\dot{g}_E = - 2,6 \text{ } \mu\text{gal/Jahr} \tag{3.3}$$

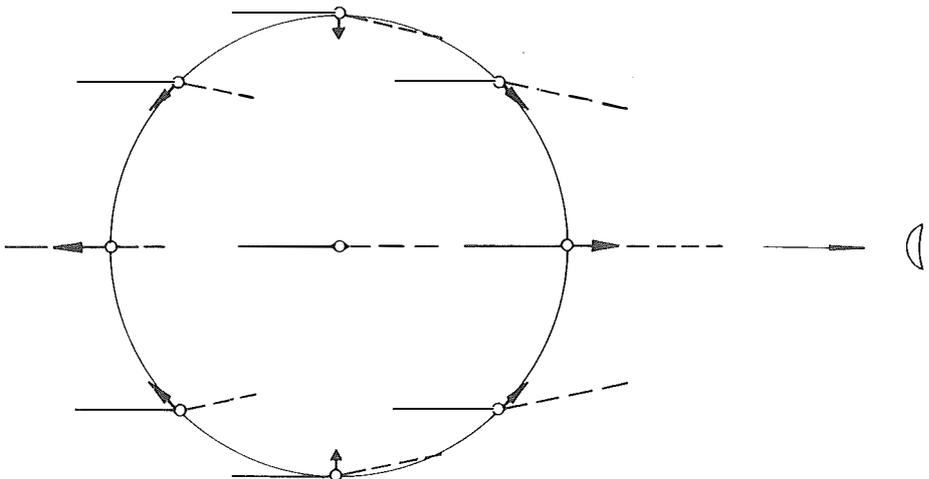
und denkt an die Möglichkeit, diesen Wert mit Absolutgravimetern zu messen. Dies erscheint unrealistisch im Hinblick auf andere Effekte, wie Massenverlagerungen im Erdmantel und vertikale Krustenbewegungen, die von derselben Größenordnung sind. Nach der *Dirac*-Theorie beträgt die Schwereänderung gar nur

$$\dot{g}_E = - 0,2 \text{ } \mu\text{gal/Jahr.} \tag{3.4}$$

Die *Dirac*-Theorie fordert eine säkulare Tagesverlängerung (2.11) und eine Zunahme des Mondbahnradius (2.5). Ein empirischer Nachweis dieser Phänomene wäre ein starkes Argument für die Theorie. Der Nachweis ist tatsächlich gelungen, allerdings wird von der Mehrzahl der Geowissenschaftler eine ganz andere Ursache dieser Erscheinungen angenommen, nämlich die Gezeitenreibung.

4. Die Gezeitenreibung

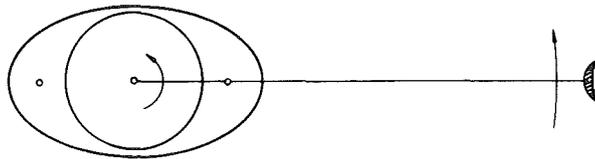
In jedem Punkt der Erde greifen zwei Kraftvektoren an, die Fliehkraft ihrer Bahnbewegung und die Attraktion durch Sonne und Mond. Der Einfachheit halber sei nur der Mond betrachtet, zumal seine Wirkung etwa doppelt so groß ist wie jene der Sonne. Während nun die Fliehkraft in allen Punkten der Erde gleich groß und gleich gerichtet ist, ist die Anziehungskraft des Mondes in verschiedenen Punkten verschieden groß (Figur 3). Die Resultierenden aus diesen Kräften führen zur Ausbildung von zwei symmetrisch gelegenen Flutbergen in den Ozeanen, wobei für die Aufhäufung dieser großen Wassermassen nicht die vertikal, sondern die tangential zur Erdoberfläche angreifenden Resultierenden verantwortlich sind. Bestände



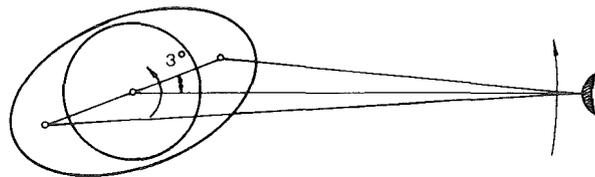
Figur 3

- Attraktionskräfte
- Fliehkkräfte
- > Fluterzeugende Kräfte

keinerlei Reibung, müßten die beiden Flutberge in der Verbindungslinie Erde — Mond zu liegen kommen (Figur 4a). Infolge innerer Reibung des Wassers und Reibung am Meeresboden kann sich die Verformung erst nach einer gewissen Zeit ausbilden, in der die Erde sich weiterdreht und die Flutberge mitnimmt. Diese eilen daher dem Mond in seiner Bahn voraus. Für einen erdfesten Beobachter dagegen tritt die Flut verspätet ein, die Flutberge wälzen sich entgegen der Drehrichtung um die Erde und verzehren Rotationsenergie, die Tageslänge nimmt zu. Der Effekt wurde erstmals von *Halley* (1695) bemerkt, aber falsch gedeutet. Die wahre Natur des Phänomens hat *I. Kant* (1754) erläutert.



Figur 4a



Figur 4b

Die Gesamtrrotationsenergie des Systems Erde—Mond muß erhalten bleiben, das bedeutet, die der Erde entzogene Rotationsenergie wird auf den Mond übertragen. Das kann man im Prinzip schon Figur 4b entnehmen. Der dem Mond zugekehrte Flutberg übt auf diesen ein positives Drehmoment aus, der abgekehrte ein kleineres negatives. Es bleibt also eine Komponente in Richtung der Bahnbewegung des Mondes, wodurch dessen Bahndrehimpuls L_M vergrößert wird. Eine Vergrößerung von L_M aber bewirkt eine Zunahme des Bahnradius a_M und Abnahme der sogen. mittleren Bewegung n_M . Um das einzusehen, geht man vom 2. *Kepler-Gesetz* (Flächensatz) aus:

$$df = L_M \cdot dt/2m_M, \quad m_M = \text{Mondmasse}, \quad (4.1)$$

(f ist die vom Radiusvektor Erde-Mond in der Zeit t überstrichene Fläche).

Faßt man die Mondbahn genähert als Kreisbahn auf und integriert über einen vollen Umlauf, so folgt:

$$a_M^2 \pi = L_M \cdot U_M/2m_M, \quad U_M = \text{Umlaufperiode} \quad (4.2)$$

Zieht man noch das 3. *Kepler-Gesetz* heran:

$$a_M^3/U_M^2 = \text{const} = n_M^2 \cdot a_M^3 \quad (4.3)$$

und eliminiert U_M aus (4.2) und (4.3), so gewinnt man:

$$L_M^2 = \text{const} \cdot a_M, \quad (4.4)$$

d. h. wächst L_M , wächst auch a_M und n_M nimmt ab, was zu zeigen war.

Die säkulare Verlangsamung der Erdrotation kann man aus dem Vergleich der vorausgerechneten mit den beobachteten Positionen von Planeten und Monden relativ zu den Fixsternen bestimmen. Die berechneten Positionen folgen durch Integration der nach dem *Newtonschen* Gravitationsgesetz gebildeten Bewegungsgleichungen. Die unabhängige Variable dieser Bewegungsgleichungen ist eine durch das Gravitationsgesetz definierte, gleichförmige Zeit, genannte „Dynamische Zeit TD“ (früher Ephemeridenzeit; vgl. *Bretterbauer*, 1984). Die Beobachtungen dagegen erfolgen nach der aus der Erdrotation abgeleiteten ungleichförmigen Zeitskala (= Weltzeit UT). Aus der Differenz $TD - UT = \Delta T$ folgt der gesuchte Effekt. Die Bestimmung gelingt umso besser, je schneller der beobachtete Himmelskörper bewegt ist. Die raschest bewegten Objekte sind heute die künstlichen Erdsatelliten. Leider sind sie für diesen Zweck nicht brauchbar, weil sie wegen ihrer geringen Masse auch nicht-gravitativen Einflüssen unterliegen. Das nach den Satelliten schnellste Objekt ist der Mond. Bei ihm aber wird die genaue Berechnung der Position erschwert, weil dazu der zweite gesuchte Effekt, die Änderung von a_M bzw. n_M bekannt sein muß. Man kann für die Bestimmung von ΔT auch Beobachtungen des Planeten Merkur heranziehen.

Genaue Beobachtungen von Mond und Merkur liegen Beobachtung seit der Erfindung des Fernrohres, also seit etwa 350 Jahren, vor. Eine Analyse dieser Beobachtungen (*Morris*, 1978) ergab eine Änderung der mittleren Bewegung des Mondes von

$$\dot{n}_M = - (26 \pm 2)''/(\text{Jahrhundert})^2; \tag{4.5}$$

(man beachte, daß \dot{n}_M eine Beschleunigung darstellt!). Die Tagesverlängerung der Erde folgte zu

$$\dot{T}_E = + (2,5 \pm 0,2) \text{ ms/Jahrhundert.} \tag{4.6}$$

Aus (4.3) und (4.5) schließlich errechnet man die Vergrößerung des Mondbahnradius zu:

$$\dot{a}_M = + 4 \text{ cm/Jahr.} \tag{4.7}$$

Diese Werte weichen von den aus der *Dirac*-Theorie errechneten Werten (2.5) und (2.11) nicht so stark ab, daß angesichts der enormen Schwierigkeiten der empirischen Bestimmung eine Entscheidung zugunsten der *Dirac*-Theorie oder jener der Gezeitenreibung möglich wäre.

Historische Berichte über Sonnen- und Mondfinsternisse erlauben die Ausdehnung der Untersuchungen über die Gezeitenbremse auf mehr als 2500 Jahre in die Vergangenheit. Der derzeit älteste Bericht findet sich auf einer assyrischen Tontafel und betrifft die partielle Sonnenfinsternis vom 15. Juni 763 v. Chr. (*Stephenson*, 1982). Zahlreiche, mehr oder minder gut dokumentierte Berichte sind babylonischen, chinesischen, griechischen und arabischen Ursprungs. Die Auswertung dieser Berichte ist das glänzende Ergebnis der Zusammenarbeit von Historikern, Sprachwissenschaftlern und Himmelsmechanikern. Aufgrund dieser Berichte wurde die Tagesverlängerung zu

$$\dot{T}_E = + (1,8 \pm 0,1) \text{ ms/Jahrhundert} \tag{4.8}$$

berechnet. Zur Feststellung eines so kleinen Betrages waren keineswegs präzise Zeitmessungen erforderlich. Solche waren im Altertum ja gar nicht möglich. Die Berichte enthalten denn auch, wenn überhaupt welche, so nur vage Zeitangaben. Es sind die Ortsangaben über Finsternisereignisse, die solche Berechnungen ermöglichen. So winzig der Betrag (4.8) erscheinen mag, bewirkt er doch, daß die Erduhr seit Christi Geburt gegenüber einer gleichförmig ablaufenden Zeitskala um 3^h40^m zurückgeblieben wäre. Die Erde dreht sich in dieser Zeit aber um fast 55° weiter, das sind z.B. in der Breite von Babylon mehr als 5000 km. Die Bahn des

Schlagschattens des Mondes bei einer totalen Sonnenfinsternis auf der Erdoberfläche ist aber selten breiter als 250 km, die Angabe des Beobachtungsortes ersetzt also eine genaue Zeitmessung.

Auch wenn man dadurch nunmehr fast drei Jahrtausende Rotationsverhalten der Erde überblickt, so entspricht dies doch nur einer Momentaufnahme im Vergleich zu den geologischen Epochen. Es war daher eine sensationelle Entdeckung als es *Wells* (1963) gelang, schonfrüher bemerkte Strukturen an fossilen Korallen aus dem Devon (400.10⁶ Jahre zurück) als tägliche und jährliche Wachstumsinkremente zu deuten und auszuzählen. Die täglichen Inkremente sind durch den Lichtwechsel, die jährlichen durch den Temperaturwechsel bedingt. Inzwischen wurden solche Wachstumsringe auch an anderen biologischen und mineralogischen Strukturen nachgewiesen (vgl. *Runcorn*, 1970). Die Auszählung ergab rund 400 Tagesinkremente innerhalb eines Jahresrhythmus. Macht man allein die Gezeitenreibung für die Tagesverlängerung verantwortlich, so ist die Jahreslänge aus himmelsmechanischen Gründen praktisch unveränderlich. Die Befunde aus den fossilen Korallen lassen demnach nur den Schluß zu, daß die Tage vor 400.10⁶ Jahren kürzer waren. Daraus errechnet sich die Tagesverlängerung zu:

$$\dot{T}_E = + 1,9 \text{ ms/Jahrhundert}, \quad (4.9)$$

ein wirklich erstaunliches Resultat. Ein Schönheitsfehler dieser Theorie allerdings ist das fast gänzliche Fehlen von Studien an heutigen Organismen, die den vorausgesetzten Wachstumsrhythmus beweisen (*Brosche*, 1980).

An dieser Stelle soll nun, wie anfangs angekündigt, demonstriert werden, wie man Widersprüche aufdecken kann, ohne sich ein Urteil in dem jeweiligen Fachgebiet anzumaßen. Das Ergebnis (4.9) scheint auch die *Dirac*-Hypothese zu stützen. Tatsächlich aber schließen die *Dirac*-Theorie und die paläontologischen Befunde einander aus. Das *Diracsche* Gesetz (2.7) ist ein Exponentialgesetz, ebenso die Gesetze für den Erdradius und die Bahnradien der Planeten und Monde. Setzt man t = Jahre vor der Gegenwart, und integriert die betreffenden Differentialformeln in die Vergangenheit, so erhält man z.B. für die Gravitationskonstante

$$G_t = G_o \cdot \exp(7,7 \cdot 10^{-10} \cdot t) = G_o \cdot e^{\alpha \cdot t} \quad (4.10)$$

(der Index o bedeutet Gegenwart). Analog folgt für Bahnradien:

$$a_t = a_o \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \text{ oder für die Rotationsperiode der Erde} \\ T_t = T_o \cdot e^{-2\alpha \cdot t}. \quad (4.11)$$

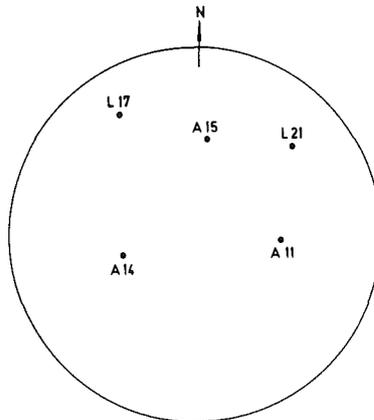
Nach der Theorie von *Dirac* waren in der Vergangenheit sowohl Tag als auch Jahr kürzer. Die Jahreslänge in der Vergangenheit folgt aus dem 3. *Kepler*-Gesetz. Es läßt sich nun leicht zeigen, daß in dem Verhältnis Jahreslänge/Tageslänge sich der Faktor $e^{\alpha \cdot t}$ restlos herauskürzt, und man erkennt, daß die Anzahl der Erdumdrehungen in einem Jahr zu allen Zeiten dieselbe ist wie heute, nämlich 366,24... Somit ist gezeigt, daß die *Dirac*-Hypothese und die paläontologischen Wachstumsbefunde unvereinbar sind. Eine der beiden Theorien muß falsch sein.

Es soll auch erwähnt werden, daß prominente Wissenschaftler, wie *Darwin*, *Jeffreys*, *Munk* und *Mac Donald* die Gezeitentheorie kritisiert haben. Die Gezeitenwirkung hängt stark von der Entfernung Erde – Mond ab. Vor 1 – 2 Milliarden Jahren hätte der Mond der Erde so nahe sein müssen, daß kilometerhohe Gezeitenwellen, ein Verdampfen der Ozeane, ja sogar ein Aufschmelzen der Erdkruste die Folgen gewesen wären. Für die letzten 2. 10⁹ Jahre jedoch gibt es keine geologische Evidenz für solch katastrophale Ereignisse. Weiters wurde von manchen Autoren eingewendet, daß die Reibung in den Tiefseen zu gering ist und nur in den flachen Schelfmeeren nennenswerte Kräfte entfaltet. Das einzige größere Schelfmeer ist die Be-

ring-See, viel zu klein, um die beobachtete Bremsung der Erdrotation zu erklären. Weiters müßte die Rotation des Planeten Merkur infolge seiner geringen Distanz von der Sonne längst erloschen sein und er der Sonne stets dieselbe Seite zuwenden, wie dies der Mond in bezug auf die Erde tut. Es war eine große Überraschung, als man vor etwa 25 Jahren aus Radarmessungen eine Rotation des Merkur von 58,65 Tagen bei einer Revolution von fast 88 Tagen entdeckte. Die Gezeitenreibung kann also nicht so stark wirken, wie angenommen.

5. Ist eine Klärung durch moderne Meßmethoden möglich?

Die neuesten technischen Entwicklungen eröffnen die Möglichkeit der direkten Messung der genannten Phänomene mit der Geodäsie eigenen Verfahren. Seit mehr als einem Jahrzehnt werden Laser Distanzmessungen zu insgesamt fünf Reflektoren auf dem Mond ausgeführt, die von den sowjetrussischen Lunochod- und den amerikanischen Apollo-Missionen abgesetzt worden sind. Die Genauigkeit dieser Messungen konnte in den letzten Jahren



Figur 5: Laser-Reflektoren auf dem Mond.

auf wenige Zentimeter gesteigert werden, sodaß die angegebene Änderung des Mondbahnradius in wenigen Jahren nachweisbar sein müßte. Das Problem ist allerdings außerordentlich verwickelt, muß doch eine Vielzahl von Parametern berücksichtigt werden. Vor allem ist eine exakte Positionsbestimmung von Laser-Station und Reflektor notwendig. Das Haupthindernis dabei bilden unter anderem die Gezeiten der festen Erde und des Mondes. Der Gezeitenhub der festen Erde kann in Abhängigkeit von Breite und geologischen Gegebenheiten der Station bis zu 35 cm erreichen. Die Unsicherheit der Bestimmung des Gezeitenhubes von Erde und Mond beträgt ein Mehrfaches des gesuchten Effektes. Immerhin haben bisherige Messungen eine Änderung der mittleren Bewegung des Mondes von

$$\dot{n}_M = -(18 \pm 20)''/\text{Jahrhundert}^2 \tag{4.12}$$

ergeben, was einer Änderung des Mondbahnradius von

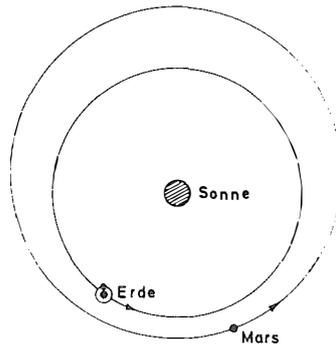
$$\dot{a}_M = +(2,6 \pm 2,9) \text{ cm/Jahr} \tag{4.13}$$

entspricht. Zwar fügen sich die Werte gut in das bisherige Bild, doch können sie auf grund der mittleren Fehler nicht als verläßlich gelten.

Eine Genauigkeitssteigerung verspricht man sich von einer Interferometrie mit langen Basen (VLBI) nach künstlichen Radioquellen auf dem Mond. Dadurch wird allerdings das Problem der Positionsbestimmung nicht behoben und außerdem ist kaum zu erwarten, daß solche Messungen uns in die Lage versetzen, eindeutig zwischen der Theorie der Gezeitenreibung und der *Dirac*-Hypothese zu entscheiden. Um für oder gegen die *Dirac*-Hypothese zu entscheiden, muß man nach einem von der Gezeitenreibung unbeeinflussten Phänomen suchen. Eine Möglichkeit dürfte ein Vorschlag von *Hughes* (1977) bieten. Die Bahnen von Erde und Mars sind wegen unterschiedlicher Exzentrizität nicht konzentrisch (Figur 6). Ihr minimaler Abstand beträgt rund $55 \cdot 10^6$ km, ihr maximaler $110 \cdot 10^6$ km, im Mittel $83 \cdot 10^6$ km. Nach (2.8) müßte die Änderung dieses mittleren Abstandes D

$$\dot{D} = + 640 \text{ cm/Jahr} \quad (4.14)$$

betragen, in 10 Jahren also 64 m. *Hughes* schlägt ein optisches Transpondersystem für eine Laser-Distanzmessung Erde-Mars vor. Da die Umlaufperiode des Mars fast doppelt so groß wie die der Erde ist, können Messungen nur etwa alle drei Jahre ausgeführt werden, dazwischen sind die Abstände zu groß. Dafür beträgt die erwartete Abstandsänderung bereits 12 m!



Figur 6

Seit 1955 verfügt die Wissenschaft neben der schon erwähnten dynamischen Zeit TD über ein weiteres gleichförmiges Zeitmaß, die Atomzeit TA. Diese beruht auf den Gesetzen der Quantenmechanik. Derzeit gelten TD und TA als absolut äquivalent. Eine Änderung von G jedoch würde ein langsames Auseinanderdriften der beiden Zeitskalen verursachen. *Van Flinders* (1975) hat die hochpräzisen photographischen Beobachtungen des US Naval Observatory von Sternbedeckungen durch den Mond der Jahre 1955 – 1974 bezogen auf Atomzeit analysiert. Er fand eine Abweichung der beiden Zeitmaße TD und TA, die nur durch eine Änderung der Gravitationskonstanten im Ausmaß

$$\dot{G}/G = - (8 \pm 5) \cdot 10^{-11} / \text{Jahr} \quad (4.15)$$

gedeutet werden kann, was unbeschadet des relativ großen mittleren Fehlers im Hinblick auf (2.7) ein phantastisches Ergebnis und eine gewichtige Stütze der *Dirac*-Hypothese darstellt.

6. Schlußfolgerungen

Nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaften bringt kein Argument einen schlüssigen Beweis für die Expansionstheorie, aber auch keinen dagegen. Alle Hinweise müssen sorgfältig geprüft werden, ohne sich zu voreiligen Schlüssen hinreißen zu lassen. Eine Lösung des komplexen Problems darf in der Zukunft erwartet werden, nicht zuletzt aufgrund von geodätischen Meßverfahren. Bis dahin kann man, vorsichtig formulierend, folgende Aussagen machen:

Bevor über folgenschwere kosmologische Theorien entschieden ist, wird man vernünftigerweise bei der *Einsteinschen* Vorstellung bleiben, daß die Naturgesetze, insbesondere die Gravitationskonstante, in Raum und Zeit unveränderlich sind. Vielleicht aber sollte man G besser „Gravitationsparameter“ nennen.

Die Expansion der Erde, aus welchen Ursachen immer, ist wahrscheinlich auszuschließen.

Die Gezeitenreibung war sicher ein himmelsmechanischer Effekt von Bedeutung für die Entwicklung des Systems Erde-Mond; möglicherweise aber wird die Wirksamkeit überschätzt.

Die Drift der Kontinente erscheint durch die Plattentektonik hinlänglich erklärt.

Die lange Zeit des Bestehens der Erde und des Sonnensystems sichert deren weitere Stabilität.

Literatur:

- Bretterbauer, K.*, 1984: Die Zeit – Wichtigste Meßgröße der Geodäsie. Geodätische Woche Ober-
gurgl, 1984, im Druck.
- Bretterbauer, K.*, 1984: Die Rolle der Zeit in Astronomie und Geodäsie. In: Das Phänomen Zeit.
Horvat, M., Hrsg., Literas Verlag, Wien, 1984, im Druck.
- Brosche, P.*, 1980: Gezeitenreibung im Erd-Mond-System. Sterne und Weltraum, 7–8, 1980,
S. 245.
- Bülow, K.*, 1963: Die Entstehung der Kontinente und Meere. Kosmos, Stuttgart, 1963.
- Carey, S.W.*, 1976: The Expanding Earth. Elsevier, Amsterdam, 1976.
- Dirac, P.A.M.*, 1937: The Cosmological Constants. Nature, 139, S. 323.
- Dirac, P.A.M.*, 1974: Cosmological Models and the Large Number Hypothesis. Proc. Roy. Soc.,
London, A 338, S. 439.
- Egyed, L.*, 1963: The Expanding Earth. Nature, 197, S. 1059.
- Egyed, L.*, 1969: Physik der festen Erde, Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Flandern, van, T.C.*, 1975: Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 170, S. 333.
- Hilgenberger, O.C.*, Vom wachsenden Erdball, Berlin, 1933.
- Hospers, J.; van Andel, S.I.*, 1970: Statistical Analysis of Ancient Earth Radii Computed from
Palaeomagnetic Data. In: Palaeogeophysics, S.K. Runcorn, Ed., Academic Press, London, 1970, S. 407.
- Hughes, J.L.*, 1977: Laser Ranging Techniques Required to Test Dirac's Cosmological Model. In:
Scientific Application of Lunar Laser Ranging, J.D. Mulholland, Ed., Reidel, Dordrecht, 1977, S. 289.
- Jordan, P.*, 1965: Die Expansion der Erde. Vieweg, Braunschweig, 1965.
- Keindl, J.*, 1940: Dehnt sich die Erde aus? Herold, München-Solln.
- Lauterbach, R.*, 1975: Physik des Planeten Erde. Ferdinand Enke, Stuttgart, 1975.
- Lindemann, B.*, 1927: Kettengebirge, kontinentale Zerspaltung und Erdexpansion. Jena, 1927.
- Mach, E.*, 1901: Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Leipzig, 1901.
- Meurers, J.*, 1984: Kosmologie heute. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1984.
- Morrison, L.V.*, 1978: Tidal Deceleration of the Earth's Rotation Deduced from Astronomical Obser-
vations in the Period A.D. 1600 to the Present. In: Tidal Friction and the Earth's Rotation. Brosche, P. und
Sündermann, J., Hrsg., Springer, Berlin, 1978, S. 22.
- Runcorn, S.K.*, Ed., 1970: Palaeogeophysics. Academic Press, London.
- Stephenson, F. R.*, 1982: Historical Eclipses. Scientific American, Oct. 1982, S. 154.
- Stewart, A.D.*, 1970: Palaeogravity. In: Palaeogeophysics. Runcorn, S.K., Ed., Academic Press,
London, 1970, S. 413.
- Unsöld, A.*, 1967: Der neue Kosmos. Springer, Berlin, 1967.
- Voigt, H.H.*, 1975: Abriss der Astronomie. Bibliographisches Institut, Mannheim, 1975.
- Walter, H.G.*, 1976: Wie veränderlich ist die Gravitationskonstante? Sterne und Weltraum, 2, 1976,
S. 41.
- Wegener, A.*, 1915: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Vieweg, Braunschweig, 1915.
- Wesson, P.S.*, 1980: Gravity, Particles and Astrophysics. Reidel, Dordrecht, 1980.
- Westphal, W.H.*, 1970: Physik. Springer, Berlin, 1970.