Gezeitenreibung im Erde-Mond-System

PETER BROSCHE
Sternwarte der Universität Bonn

Summary. Tidal Friction in the Earth–Moon System

From ancient solar eclipses, transits of Mercury, Lunar Laser Ranging and the growth rhythms of fossil animals one can deduce a deceleration of the earth's rotation and also a deceleration in the mean orbital angular velocity of the moon. The corresponding decrease in the earth's angular momentum and the increase in the angular momentum of the lunar orbit match each other. Therefore both seem to be expressions of one and the same interaction. Of several possibilities, tidal friction connected with oceanic tides appears to be the most plausible candidate for this interaction process. Oceanographic computations can reproduce the observed value of tidal friction; furthermore, for oceans of the geological past one sometimes obtains even smaller values than today. This provides a possible way out of the dilemma of schematic backward integrations – to reach a narrow situation between earth and moon in only 1 or $2 \cdot 10^9$ years. Characteristic numerical values of tidal friction can be expressed by several parameters: the length of the terrestrial day increases 2 ms per century, the torque is $5 \cdot 10^{23}$ dyn cm (negative for the earth, positive for the lunar orbit), the angular velocity of the lunar orbit decreases by $30''/\text{century}^2$.

1. Einleitung

Die Systeme niedrigster hierarchischer Stufe, die wir im Kosmos kennen, und die wirklich den Namen Systeme verdienen, sind die Planeten-Satelliten-Systeme. Auch die Planeten ohne Monde wollen wir zu diesen Systemen rechnen. Aus naheliegenden Gründen kennen wir nur die in unserem eigenen Sonnensystem. Zwischen den beiden fundamentalen Parametern Masse und Drehimpuls dieser Systeme besteht anscheinend eine enge Beziehung (Brosche, 1963), aus der nur Merkur und Venus mit ihrer langsamen Rotation herausfallen. Mindestens für Merkur gibt es aber die gute Ausrede, daß er ursprünglich auch die Beziehung erfüllt haben könnte, aber seine Rotation durch Gezeitenwechselwirkung mit der Sonne abgebremst worden sei. Für Venus ist diese Deutung weniger überzeugend, daher hat Singer (1970) den retrograden Einfang eines Körpers von der doppelten Masse unseres Erdmondes vorgeschlagen, der nach starker Wechselwirkung auf die Venus gefallen sein soll und auf diese Weise ihren früheren Drehimpuls großenteils annihiliert haben würde.

Die Wirkung der Gezeitenkräfte des Zentralplaneten auf seine Monde ist im Falle der vier großen Jupiter-Monde besonders auffällig. Jedenfalls glaubt man viele der tektonischen Einzelheiten, die auf den Bildern von Voyager 1 und 2 zu erkennen sind, auf Gezeiten zurückführen zu können und zwar desto deutlicher, je näher die Bahn des Mondes um den Jupiter führt.

Ungleich der Situation bei den astronomischen Objekten höherer hierarchischer Stufe (z. B. schon dem ganzen Planetensystem selbst), besteht der Gesamtdrehimpuls der Planeten-Satelliten-Systeme überwiegend aus Rotationsdrehimpuls der Zentralkörper und nicht aus Bahndrehimpuls. Die einzige Ausnahme ist das Erde-Mond-System: heute ist der Bahndrehimpuls etwa 5mal größer als der Rotationsdrehimpuls der Erde (der Rotationsdrehimpuls des Mondes kann – außer vielleicht in einem frühen Zustand – vernachlässigt werden). Der heutige Zustand könnte aber gerade durch den im folgenden näher betrachteten Prozeß der Gezeitenreibung aus einem „alten“ Zustand hervorgegangen sein, der die allgemeine Regel erfüllte.

Da außer dem Erdmond alle anderen Satelliten im Verhältnis zu ihrem Planeten sehr wenig Masse enthalten, kann man ihre Bahnen hypothetisch variieren, ohne die empirische Masse-Drehimpuls-Korrelation zu verletzen. Zum Beispiel kann man annehmen, daß die Monde zunächst Asteroiden waren und erst durch Einfang mit Gezeitenwechselwirkung zu Monden wurden, wenn einem von der Zusammensetzung her eine gemeinsame Entstehung nicht paßt. Dies ist bei den beiden winzigen Marsmonden Phobos und Deimos der Fall, die, unähnlich ihrem Zentral-Planeten, eher aus dem gleichen Stoff wie die kohligen Chondriten vom Typ I zu bestehen scheinen (d. h. aus einer Mischung, die man für sehr urtümlich hält). Lambeck (1979) hat kürzlich gezeigt, daß die Einfanghypothese bei Phobos gut möglich ist, bei Deimos hingegen zusätzlicher Annahmen bedarf. Bei unserem Mond begegnen wir derselben Problematik, aber in verschärfter Form. Einerseits scheint es empirisch gesichert zu sein, daß der Mond nicht die gleiche chemische Zusammensetzung wie die Erde als Ganzes haben kann, eher noch die des Erdmantels. Andererseits unterliegen dynamische Gedankenexperimente mit dem Monde (z. B. Einfang, Abspaltung von der Erde) weitaus schärferen Einschränkungen, wenn man nicht die vermeintliche Lösung eines Problems mit der Schaffung mehrerer neuer Probleme bezahlen will. Das Zuschieben von Schwarzen Petern von einem Spezialgebiet ins andere hilft hier nicht weiter; man muß die offenen Fragen unter simultaner Einbeziehung aller Aspekte bearbeiten. Der richtige Anfang auf diesem Wege wird das chronologische Ende sein, da wir über dieses – die Gegenwart – am meisten wissen und von hier aus die sich immer mehr verzweigenden Möglichkeiten in die Vergangenheit hinein untersuchen können.

Gezeitenkräfte sind im Prinzip etwas sehr Einfaches, nämlich Differenzen von Gravitationskräften. Sie sind überdies im Planetensystem besonders einfach, weil es meistens nur auf die von e i n e m Körper ausgehende Kraft ankommt und weil außerdem dieser Körper meist als Punktmasse angesehen werden darf. Trotz dieser Einfachheit der Kräfte sind die von ihnen hervorgerufenen Erscheinungen – Gezeiten aller Arten – alles andere als einfach. Das liegt schon an der Vielfalt der Möglichkeiten der Orientierungen von Bahnebenen, Rotations-Achsen und der Verhältnisse zwischen Bahn- und Umdrehungsperioden. Dann aber liegt es vor allem an der verschiedenen physischen Beschaffenheit der Körper, auf die die Gezeitenkräfte wirken. Hier ist das Gesamtgebiet der Planetenkunde gefordert und im Grunde auch alle Gebiete der Physik, z. B. die Festkörperphysik der Materie unter extremen Bedingungen. Es ist daher ganz und gar unmöglich, einen realistischen Überblick über alle Arten von Gezeiteneffekten im Planetensystem zu geben. Die einzige allgemeine Aussage ist vermutlich die, daß Gezeitenkräfte, die größer sind als die inneren gravitativen Bindungskräfte eines Körpers, dessen Entstehung verhindern werden, sobald der Körper so groß sein würde, daß die anderen Bindungskräfte (die Kohäsion) keine Rolle mehr spielen. So erklärt man den Saturnring mit der Rocheschen Grenze des Saturns. Für alle weitergehenden Aussagen wollen und müssen wir uns auf die Betrachtung e i n e s Systems beschränken, eines, das uns am nächsten liegt und das auch ohne diese Perspektive zu den interessantesten zählt, nämlich auf die Betrachtung des Erde-Mond-Systems.

Auch mit dieser Einschränkung berührt unser Thema so viele Disziplinen, hat eine so lange Geschichte und bezieht sich auf ein so vielfach verflochtenes Netz von Befunden und Argumenten, daß es jeden zur Verzweiflung treiben muß, der darauf besteht, es nach e i n e m logischen Gesichtspunkt zu gliedern und darzustellen. Die sonst so zweckmäßige Einteilung in Beobachtungen einerseits und theoretische Interpretation andererseits läßt sich hier nicht durchhalten oder zumindest nur stückweise. Wenn ich mich entschlossen habe, ganz grob eine historische Abfolge einzuhalten, in der mehr empirisch und mehr theoretisch orientierte Kapitel einander abwechseln, so liegt das daran, daß diese Folge gleichzeitig eine natürliche Sequenz im Sinne steigender Schwierigkeiten darstellt und daß alle behandelten Fragen auch heute noch für unser Thema relevant sind und stets von neuem diskutiert werden müssen.

2. Die Anfänge

Der erste, der einen empirischen Befund zu unserem Thema beigesteuert hat – ohne sich dessen bewußt zu sein – war der bekannte englische Astronom Halley (1695). Er stellte fest, daß er zeitgenössische und antike Sonnenfinsternisse nicht unter einen Hut bringen konnte, wenn er nicht ad hoc Änderungen in der mittleren Bewegung des Mondes einführte, die auf eine „säkulare Akzeleration des Mondes" in seiner Winkelgeschwindigkeit hinausliefen. Diesen Namen hat unser Problem denn auch in den ersten zwei Jahrhunderten ganz überwiegend getragen. Entgegen gelegentlich zu findenden Behauptungen hat Halley allerdings noch keinen Zahlenwert für die beobachtete Akzeleration gegeben. Ein solcher wurde erst 1749 von Dunthorne vorgelegt (Stephenson 1978). Die Unterschiede, auf die Halley stieß, hatten in Zeit ausgedrückt die Größenordnung einer Stunde. Nun geben die antiken Beschreibungen im allgemeinen gar nicht die Stunde der Erscheinung, und wenn, dann kaum vertrauenswürdig genug. Aber die Erde dreht sich in einer Stunde um 15° und die schmale Zone der Totalität berührt dann andere Orte der Oberfläche! Es sind also die O r t s angaben, aus denen die zeitlichen Differenzen erschlossen werden können, jedenfalls dann, wenn die Orte nicht gerade auf dem den Breitenkreisen nahezu parallelen Teil der Totalitätszone liegen.

Der theoretische Teil des Stammbaums unseres Themas beginnt mit Immanuel Kant (Felber 1974, Brosche 1977). Er stellte im Rahmen einer Preisschrift für die Berliner Akademie 1754 die Gründe dar, die für eine Verlangsamung der Erdrotation durch die bremsende Wirkung der Meeresgezeiten sprechen. Diese später zunächst vergessene Arbeit war ersichtlich ohne Kenntnis der „säkularen Akzeleration" und ohne Verknüpfung zu ihr geschrieben worden. Irgendwann in den nächsten Jahrzehnten muß erstmals der Gedanke aufgetaucht sein, daß die säkulare Akzeleration des Mondes gar nicht wirklich – oder nicht allein – ein Effekt in der mittleren Länge des Mondes zu sein brauchte, sondern nur oder auch an der Zeitskala liegen konnte. Denn wenn eine gleichförmige Bewegung mit einer Uhr gemessen wird, die zunehmend langsamer geht, der Beobachter

das aber nicht weiß, hält er die Bewegung für beschleunigt. Diesen äußerst wichtigen Einfall hat vielleicht schon Tobias Mayer gehabt; als Praktiker, der er war, hat er ihn mutmaßlich deswegen nicht ausgeführt, weil er keine Möglichkeiten für handfeste Zahlenangaben sah (Forbes 1971).
Mit der möglichen Interpretation der säkularen Akzeleration als Erdrotationseffekt stand im Prinzip auch Kants Vorschlag wieder zur Debatte. Er mußte allerdings „neu“ entdeckt werden, bevor man sich seiner wieder erinnerte (Wackerbarth, 1867). Schließlich fehlte bei Kant noch die Einsicht, daß es sich hier um eine Wechselwirkung zwischen Erde und Mond handelt, die folgerichtig auch Wirkungen auf den Mond haben mußte. Die erste qualitativ vollständige Beschreibung des Prozesses findet sich bei Robert Mayer (1848). Sein Beitrag stand und steht im Schatten von G.H. Darwin (1879, 1880) und anderen, die später das Problem analytisch behandelt haben. Nachdem wir heute wissen, daß die physikalische Basis dieser analytischen Diskussionen nicht trägt, knüpfen wir den Faden im Grunde genommen wieder bei Robert Mayer an. Seine Darstellung war im wesentlichen diese: durch die Gezeiten wirkt ein Drehmoment zwischen Erde und Mond, das die Rotation der Erde verlangsamt, und andererseits den der Erde abhanden kommenden Drehimpuls auf die Mondbahn überträgt. Nach den Keplerschen Gesetzen weitet sich die Mondbahn aus unter Verlängerung der Umlaufzeit. Das heißt, die wahre Winkelgeschwindigkeit des Mondes verringert sich sogar, wir haben eine Retardation, während die beobachtete Akzeleration nur auf die Ungleichförmigkeit der verwendeten Uhr – die Erdrotation zurückgeht. Das Drehmoment wird dadurch erzeugt, daß die zwei Gezeitenberge, die die Reaktion der Erde auf die Gezeitenkräfte des Mondes grob schematisiert wiedergeben sollen, nicht genau in Phase mit dem Mond mitkommen, sondern bezüglich der Rotation der Erde etwas zurückbleiben. Damit ergeben sich horizontale Kraftkomponenten, die ein bremsendes Drehmoment auf die Erde ausüben.

3. Die klassischen astronomischen Beobachtungen und der himmelsmechanische Beitrag

Die ältesten astronomischen Beobachtungen von Sonnenfinsternissen waren die empirische Basis für die Entdeckung unseres Themas und sind bis heute immer wieder neu bearbeitet worden. Hierbei treten historische, philologische und andere außernaturwissenschaftliche Probleme auf, auf die ich hier nicht eingehen kann. Im Prinzip kann man aus diesen Daten eine Linearkombination aus den Winkelbeschleunigungen des Mondumlaufs und der Erdumdrehung erhalten, die aber überwiegend die letztere enthält, so daß es berechtigt ist, von einer direkten Messung der Erdrotation zu sprechen. Von R.R. Newton war 1972 die Überzeugung ausgesprochen worden, daß die Verlangsamung der Erdrotation innerhalb der letzten zwei Jahrtausende um den Faktor 2 variiert habe. Muller und Stephenson (1975) haben demgegenüber überzeugende Argumente dafür gefunden, daß dem nicht so ist – es wäre auch sehr schwer zu erklären – sondern daß sich alle deduzierten „Uhrstände“ unserer Erd-Uhr durch eine Parabel darstellen lassen, also mit ein- und demselben Abbremsparameter. Dieser läßt sich in mannigfacher Weise ausdrücken, z. B.

(1) als Zunahme der Tageslänge pro Jahrhundert = 2.1 Millisekunden/Jahrhundert,

(2) als Abnahme der Rotationsenergie der Erde $dE_{rot}/dt = -3.6 \cdot 10^{19}$ erg/s,

(3) als auf die Erde wirkendes Drehmoment $L = -5.2 \cdot 10^{23}$ dyn cm.

Wenn wir zur Vereinfachung von dem kleinen Einfluß der Sonne absehen, können wir sagen: das auf den Mond wirkende Drehmoment hat denselben Betrag, aber das positive Vorzeichen (denn die Mondbahn weitet sich ja aus), da der Gesamt-Drehimpuls erhalten bleibt. Dasselbe gilt aber keineswegs für die Energien: von der von der Erde abgegebenen Energie wird nur ein kleiner Teil in die Mondbahn aufgenommen, nämlich etwa das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten von Mondumlauf zu Erdrotation ($\approx 1/30$); der Rest muß in der Erde dissipiert werden. Weitere charakteristische Größen für den Mond sind

(1) die wahre Winkelbeschleunigung (bzgl. einer möglichst unverfälschten dynamischen Zeit) des Mondes

$$\dot{n} = (-30''.0 \pm 3''.0)/(\text{Jahrhundert})^2$$

und

(2) die Zunahme des lunaren Bahnradius

$$\dot{r} = +4.4 \text{ cm/Jahr}$$

alle Zahlen nach dem Ergebnis von Stephenson (1978)

Die Streuung der Uhrstände ΔT der Erduhr um die mittlere Parabel liegt in den letzten zwei Jahrtausenden bei einigen 100^s. Das scheint zunächst sehr groß gegen die genannten zwei Millisekunden zu sein, aber wir müssen hier sorgfältig zwischen einer Größe und ihrer ersten und zweiten Ableitung nach der Zeit unterscheiden. Die Physik stellt sich in der zweiten Ableitung (den Beschleunigungen) dar, die in diesem Abschnitt besprochenen Messungen (Längenwinkel, Uhrstände) korrespondieren mit der Größe selbst, variieren also mit dem Quadrat der Zeit bezüglich der Beschleunigungsgrößen. Der Effekt macht über zwei Jahrtausende vier gute Stunden aus, ist also gegen eine Streuung von einigen Minuten klar und deutlich zu erkennen. Die Streuung kommt durch einen ganzen Zoo von geophysikalischen und teilweise noch ungeklärten Variationen zustande, denen nur gemeinsam ist, daß sie nicht über Jahrhunderte im gleichen Sinn wirken und die überdies wohl innere Angelegenheiten der Erde darstellen, z.B. Wechselwirkungen zwischen Kern und Mantel oder Variationen des äquatorealen Trägheitsmoments der Erde. Aus der Größenordnung dieser störenden Variationen folgt aber auch, daß das Beginnen, innerhalb der wenigen Jahrhunderte teleskopischer Astronomie die säkulare Änderung erkennen zu wollen, hoffnungslos wäre. Die viel größere Winkelmeßgenauigkeit der teleskopischen Ära können wir dann für unser Problem ausnutzen, wenn wir nicht die Erdrotation, sondern die Bahnbewegung des Mondes betrachten. Sie ist praktisch eine Schwerpunktsbewegung und daher keinen derartigen, innerlich verursachten Variationen wie die Erdrotation unterworfen. Ihre Änderung ist zwar zahlenmäßig kleiner, aber das wird durch die höhere Genauigkeit wettgemacht. Allerdings ist ein Erfordernis unabdingbar: eine von der Erdrotation unabhängige, der physikalischen Definition möglichst nahekommende Realisierung einer Zeitskala. Man kann sie aus den Bewegungen der Körper des Sonnensystems ableiten (als sogenannte „dynamische Zeitskala“) und zwar desto genauer, je schneller sich die Körper bewegen. Die schnellste Bewegung nach dem zu untersuchenden Mond hat der Merkur. Wenn man also die beobachteten Bedeckungen von Sternen durch den Mond einbettet in eine Zeitskala, die durch die ebenfalls sehr präzise registrierten Durchgänge von Merkur durch die Sonnenscheibe definiert ist, erhält man direkt $\dot{n}$, die Winkelbeschleunigung der Mondbahn. Man beachte, daß es sich in beiden Fällen um relative Beobachtungen mit entsprechend hoher Genauigkeit handelt. Sie überdecken heute eine Zeitspanne von etwa 2,5 Jahrhunderten. Es ist sehr befriedigend, daß das neue Resultat von Morrison (1978) – $\dot{n} = -(26'' \pm 2'')/(\text{Jahrhundert})^2$ – praktisch mit dem von Stephenson und Muller übereinstimmt!

Wir haben bisher so getan, als ob es keine anderen säkularen Einflüsse auf die Mondbahn gäbe. Natürlich haben sich die Himmelsmechaniker, nachdem die säkulare Akzeleration einmal empirisch fest etabliert war, sofort bemüht, sie zu deuten. Und das hieß damals, im Sinne der Newtonschen Mechanik und ohne dissipative Vorgänge zu deuten. Tatsächlich gelang es Laplace 1787 zu zeigen, daß eine sehr langsame Änderung der Exzentrizität der Erdbahn eine Änderung der Mondbahn hervorruft, die praktisch den ganzen damals bekannten Betrag der säkularen Akzeleration erkärte.
Damit war das Thema als wissenschaftliches Problem ad acta gelegt und kam erst wieder ans Tageslicht, als Adams 1859 durch Entwicklungen höherer Ordnung nachwies, daß nur die Hälfte des beobachteten Effekts rein himmelsmechanisch zu erklären war, die andere Hälfte aber ein offenes Problem blieb. In den oben gegebenen Zahlen ist der himmelsmechanische Anteil nicht mehr enthalten.

4. Langzeit-Integrationen

Bereits die allereinfachste Abschätzung der Zeitskala des Prozesses, nämlich die Division der beteiligten Drehimpulse (z.B. desjenigen der Erde) durch das heute wirkende Drehmoment, führt auf einige 10^9 Jahre:

$$|\, P_{rot}(♁)/L \,| = 3.5 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$$

Wenn wir stattdessen eine lineare Abnahme des Mondbahnradius r postulieren, so ergibt sich (wegen des 3. Keplerschen Gesetzes)

$$\frac{r}{\dot{r}} = 8.7 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$$

Wäre die Zeitskala viel länger, so würde es sich um einen Prozeß handeln, der zwar für das Verständnis der genauen Dynamik des Erde-Mond-Systems interessant sein könnte, aber, da das System selbst nicht wesentlich verändert würde, die andern naturwissenschaftlichen Disziplinen so gut wie gar nicht berühren würde. Es ist die mögliche wesentliche Veränderung des Erde-Mond-Systems innerhalb seines eigenen Alters von etwa $5 \cdot 10^9$ Jahren, die dazu zwingt, so weitreichende Konsequenzen ins Auge zu fassen.
Ältere und neuere Versuche, das Langzeit-Verhalten des Erde-Mond-Systems genauer zu erfassen, gehen etwa folgendermaßen vor: die Gezeitenkräfte des Mondes rufen auf einer kugelsymmetrisch aufgebauten festen Erde kraftproportionale Deformationen hervor:

$$\zeta = \text{const} \left(\cos 2\,\vartheta + \tfrac{1}{3}\right)$$

Hierin ist ϑ der Winkel zwischen den Richtungen vom Zentrum der Erde zum Mond und zum betrachteten Punkt der Erdoberfläche. Dies gilt für eine elastische Erde, die ihre Form ohne die geringste Zeitverzögerung den Kräften anpaßt; damit ein Drehmoment bewirkt wird, müssen die Gezeitenberge um einen gewissen Phasenunterschied ϕ gegen die Kraft zurückbleiben. Sie werden das tun, weil die Anpassung an die Kräfte eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt (feste Erde) oder die Bodenreibung die Gezeitenberge ein Stück mitnimmt (Ozeane). Die Amplitude der Deformationen bzw. die elastischen Konstanten der Erde können z.B. aus Messungen mit Gravimetern erschlossen werden; der Phasenwinkel kann so angepaßt werden, daß er das gesuchte Drehmoment ergibt. Das Verhalten der Erde läßt sich also durch geeignete Parameter subsummieren und die anziehende Wirkung der Erddeformationen auf den Mond sind sogar sicher angemessen beschrieben, denn von einem in Kugelflächenfunktionen entwickelten Gesamt-Potential werden die Terme der Ordnung $n = 2$ in Mondentfernung dominieren. Wollen wir aber die durch diese Deformation verursachten Kräfte in die geeignet vereinfachten (z.B. zeitlich gemittelten) Bewegungsgleichungen des Mondes einführen, dann ist entscheidend, wie die Größen, die

die Stärke der Wechselwirkung definieren, nähmlich Amplitude und Phasenverschiebung, mit der Zeit oder mit dem Abstand des Mondes variieren. Hier unterscheiden sich dann die verschiedenen Ansätze. Gemeinsam ist ihnen eine sehr starke Abhängigkeit vom Abstand Erde-Mond r. Die Gezeitenkraft ruft ja im Gleichgewichtsfall eine Deformation mit der Amplitude z hervor, die proportional zu r^{-3} ist:

$$z = \frac{3}{4} h \frac{m}{M} \frac{R^4}{r^3}$$

(R = Erdradius, r = Mondbahnradius, M = Erdmasse, m = Mondmasse, h beschreibt Materialeigenschaften der festen Erde; für eine homogene Kugel vom Schubmodul μ wird

$$h = \frac{5/2}{1+(19/2)(\mu/2g\bar{\rho}R)}$$

hierin sind g die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche und $\bar{\rho}$ die Dichte). Diese Deformation bewirkt ihrerseits ein Drehmoment, das außer von der Amplitude z auch von der Phasenverzögerung ϕ abhängt (Goldreich und Soter, 1966):

$$L = \frac{8}{5} \pi G m \frac{R^4}{r^3} \rho z \sin 2\phi$$

(G = Gravitationskonstante, ρ = Dichte des Gezeitenberges). Zusammengenommen kommt es also zu einer r^{-6}-Abhängigkeit, wie sie auch bei der Dipol-Dipol-Wechselwirkung der zwischenmolekularen Kräfte auftritt.

Für ein allereinfachstes Modell kann man den Mond stets in einer Kreisbahn in der Äquatorebene der Erde umlaufen lassen, d.h. die Mondbahn ist durch einen einzigen Parameter, den Abstand r von der Erde beschrieben. Wenn ϕ als konstant angenommen wird – der Fall der linearen Reibung bei Munk (1968) – ist die Differentialgleichung der Bewegung

$$\dot{r} = \text{const.} \cdot r^{\frac{1}{2}-6}$$

und die Lösung lautet dann

$$r^{6+\frac{1}{2}} = r_G^{6+\frac{1}{2}} + (6+\tfrac{1}{2})\, \dot{r}_G\, r_G^{6-\frac{1}{2}} \cdot t$$

(der Index G bedeutet die Gegenwart, also die „heute“ beobachteten Werte). Der Wert r = 0 wird nach dieser Lösung zur Zeit t_0 angenommen, wobei

$$t_0 = - \frac{1}{6+\frac{1}{2}} \cdot \frac{r_G}{\dot{r}_G} = - 1.34 \cdot 10^9 \text{ Jahre ist}$$

(nach der früher genannten Zahl für $\dot{r}_G$).

Bei den anspruchsvolleren – zum Teil dreidimensionalen – Integrationen von Gerstenkorn (1955), MacDonald (1964), Goldreich (1964) und Singer (1968) ergibt sich ein engster Zustand Erde-Mond ebenfalls vor $1\text{-}2 \cdot 10^9$ Jahren. In diesem Zustand soll der Mond nur wenige Erdradien von der Erde entfernt gewesen sein, was äußerst drastische Konsequenzen für die Erde gehabt hätte: km-hohe Gezeitenwellen, Verdampfen der Ozeane oder gar Aufschmelzen der Erde stehen zur Wahl (je nach dem Grade der Annäherung).

Munk (1968) meint, daß Gerstenkorn wohl nicht gern seinen Namen mit einer solchen Apokalypse verbunden sehen würde. Tatsächlich gibt es aber keine geologische Evidenz für einen derart gewalttätigen Eingriff in die Erdgeschichte vor 1-2 Milliarden Jahren, und wir müßten schon deshalb nach einer Alternative für die Voraussetzungen suchen, die dem schematisierten Gezeitenbild der himmelsmechanischen Rechnungen zugrunde liegen. Denn wenn die Parameter der letzteren so gewählt werden, daß sie die gegenwartsnahe Wechselwirkung darstellen, wird die Vergangenheit unglaubwürdig. Der manchmal angedeutete Ausweg, die Ergebnisse dieser Rechnungen nur als Abfolge von Zuständen aufzufassen, deren Zuordnung zu einer Zeitskala noch frei sei, ist auch mit einem großen Fragezeichen zu versehen. Dies zunächst wegen der Verschiedenheit der Ergebnisse untereinander, dann aber auch, weil die implizite Voraussetzung, alles lasse sich durch die Änderung e i n e s Parameters beschreiben, sicher nicht erfüllt ist. Es müßten mindestens 4 Parameter im Verhältnis ihrer Änderungen richtig erfaßt sein: Energie und drei Drehimpulskomponenten. Wenn man an die geometrische Komplexität der Meeresgezeiten denkt, ist es wenig wahrscheinlich, daß diese zu einfachen Relationen zwischen den Änderungen aller vier Größen führen.

Vielfach wird die Frage aufgeworfen, zu welchem Endstadium das Erde-Mond-System durch die Gezeitenreibung gelangt. Auf den ersten Blick scheint ein solches stabiles Ende dann erreicht zu sein, wenn der Mond geostationär geworden ist; das wäre der Fall, wenn gilt: Erdentag = Mondumlauf $\approx$ 46 heutige Tage; dabei ist die Mondentfernung 540 000 km. Allerdings ist diese Überlegung doch nicht stichhaltig. Zunächst ist die erforderliche Zeitskala mit sicherlich 10^{10} Jahren so lang, daß schon nach unseren heutigen Kenntnissen in dieser Zeit alle möglichen äußeren Einwirkungen viel stärker sein können. Selbst wenn wir nur an die Sonne denken, würden deren gravitative und Strahlungseinwirkungen dominieren, sobald die obige Situation auch nur genähert eintritt. Je nachdem, wie wechselwirkungsfähig die äußeren Bestandteile der Erde dann sein werden, könnte es durch Entzug von Drehimpuls aus dem Erde-Mond-System wieder zu einem Schrumpfen dieses Systems kommen.

5. Neue Beobachtungen

Die wenigen Jahrtausende menschlicher Astronomie sind eine so kurze Zeitspanne verglichen mit dem Alter des Erde-Mond-Systems, daß die aus ersteren abgeleiteten Werte für die Gezeitenreibung nur mit großem Vorbehalt als repräsentativ auch nur für die Gegenwart angesehen werden können. Denn die Möglichkeit von Prozessen anderer Art, die Zeitskalen von Jahrtausenden haben und die Erdrotation beeinflussen, ist ja nicht von vorneherein auszuschließen.

Über alle Effekte, die nur Drehimpulsaustausche zwischen Teilen der Erde oder Fluktuationen ihres Trägheitsmoments bedeuten, müßte man eigentlich mitteln, aber der Wunsch nach Beobachtungen mit entsprechend großer Zeitskala erschien so abwegig, daß er gar nicht geäußert wurde, bis eine mögliche Erfüllung von gänzlich unerwarteter Seite, nämlich von der Paläontologie in Aussicht gestellt wurde. 1963 wurden erstmals von Wells tägliche Wachstumsinkremente in fossilen Korallen aus dem Devon innerhalb eines gleichzeitig sichtbaren Jahresrhythmus abgezählt und damit das Verhältnis der beiden Zeitabschnitte für eine fast 400 Millionen Jahre zurückliegende Epoche angegeben. Da sich die Jahreslänge aus himmelsmechanischen Gründen fast gar nicht ändert, ist mit einem solchen Verhältnis praktisch die Tageslänge gegeben. Das gleiche gilt für ebenfalls erkennbare 14tägige und monatliche Variationen in anderen Spezies, die nur dem synodischen Monat zugeordnet sein können, weil allein dieser über den Wechsel der ozeanischen Gezeiten biologische Prozesse beeinflußt. Das Hauptproblem bei der Benutzung der inzwischen angesammelten Daten (Scrutton, 1978) von Korallen, Muscheln und anderen marinen Lebewesen ist weniger ihre numerische Unsicherheit (noch nicht!), sondern das fast gänzliche Fehlen von Studien an rezenten Organismen, die den vorausgesetzten Wachstumsrhythmus beweisen. So unsicher aber auch der Einzelfall sein mag, so haben doch alle bisher zusammengetragenen Angaben ein Ergebnis gebracht, das sicher nicht zufällig zustande gekommen sein kann: die Gezeitenreibung ist danach in den lezten 500 Millionen Jahren grob die gleiche gewesen wie heute. Die Streuungen erlauben jedoch sicher Variationen um einen Faktor 2. Es besteht eine vage Andeutung einer relativ geringen Gezeitenreibung zwischen 100 und 300 Millionen Jahren. Aus Stromatoliten, d.h. aus geschichteten Verdauungsprodukten gewisser Algen und Bakterien, lassen sich sogar Aussagen für Zeiten bis 2 Milliarden Jahre in die Vergangenheit gewinnen. Danach ist die Gezeitenreibung im Mittel über ein so großes Intervall vielleicht viel kleiner als heute gewesen. Wesentliche Fragen der Gewinnung und Interpretation dieser Daten sind aber noch offen.

Die paläontologischen Messungen bestehen nicht wie bei der menschlichen Astronomie aus kumulativen Größen (Länge des Mondes, Drehwinkel der Erde) sondern aus Winkelgeschwindigkeiten bzw. Periodenlängen. Die letztlich interessierenden Beschleunigungen gehen also nicht durch zweifache, sondern durch einfache zeitliche Ableitung aus ihnen hervor. Wichtig ist, daß die Anzahl von Tagen pro Jahr und Monat mit der Vorstellung des Drehimpulstransfers von der Erde in die Mondbahn verträglich sind. Würde sich hingegen nur die Tageslänge ändern, wie es alternative Theorien vorschlagen, so würden sich die Tage pro Monat proportional zu der Zahl pro Jahr verhalten. Das entspricht nicht den Beobachtungen: in die Vergangenheit gesehen bleiben die Tage pro Monat deutlich unter dieser Proportionalität, wie es auch sein muß, wenn die Mondbahn früher näher an der Erde lag und der Monat kürzer war.

Unter sehr vereinfachenden Annahmen (Rotationsdrehimpuls der Erde und Bahndrehimpuls stets parallel, Mondbahn immer kreisförmig) gilt die folgende Beziehung zwischen der Zahl n der Tage im synodischen Monat und der Zahl N der Tage im Jahr:

$$n = \frac{N}{N+1 - \left(\frac{\text{Jahr}}{2\pi}\right) \dfrac{G^2\, y^3\, M^5}{\left(P - 2\pi\theta\, \frac{(N+1)}{\text{Jahr}}\right)^3}}$$

G = Gravitationskonstante,

$y = M_{\delta}\, M_M / M^2$

(M_{δ}, M_M, M = Erd-, Mond-, Gesamtmasse)

θ = Trägheitsmoment der Erde

P = Gesamtdrehimpuls des Erde-Mond-Systems

Immer wieder ist versucht worden, aus Abweichungen des Mondes von der Kugelsymmetrie, im besondern aus den Mare-Oberflächen, auf einen engeren Zustand Erde-Mond bei der Bildung dieser Oberflächen zu schließen, die eine Äquipotentialfläche zur Zeit ihrer Entstehung darstellen sollen. Dieser Gedanke ist kürzlich wieder von Anderson (1978) näher ausgeführt worden, der auf einen kleinsten Mondabstand von 10 Erdradien kommt. Demgegenüber hat Kopal (1972) betont, daß die Ungleichheiten der lunaren Trägheitsmomente bei einer „kalten" Entstehung auch zufällig zustande gekommen sein können; ferner seien die Mare-Oberflächen alle so beträchtlich gegeneinander geneigt, daß eine Interpretation im Sine einer alten Potentialfläche nicht zulässig sei (private Mitteilung).

Daß selbst heute noch die Gezeitenkräfte der Erde das Innere des Mondes beeinflussen, zeigen auf eindrucksvolle Weise die Mondbeben, die von dem „Appolo seismic network" registriert wurden. Die Beben zeigen klar eine 27^d-Periode, und die Tiefe ihrer Epizentren kann theoretisch als Tiefe des maximalen Gezeiten-Stress verstanden werden (Cheng und

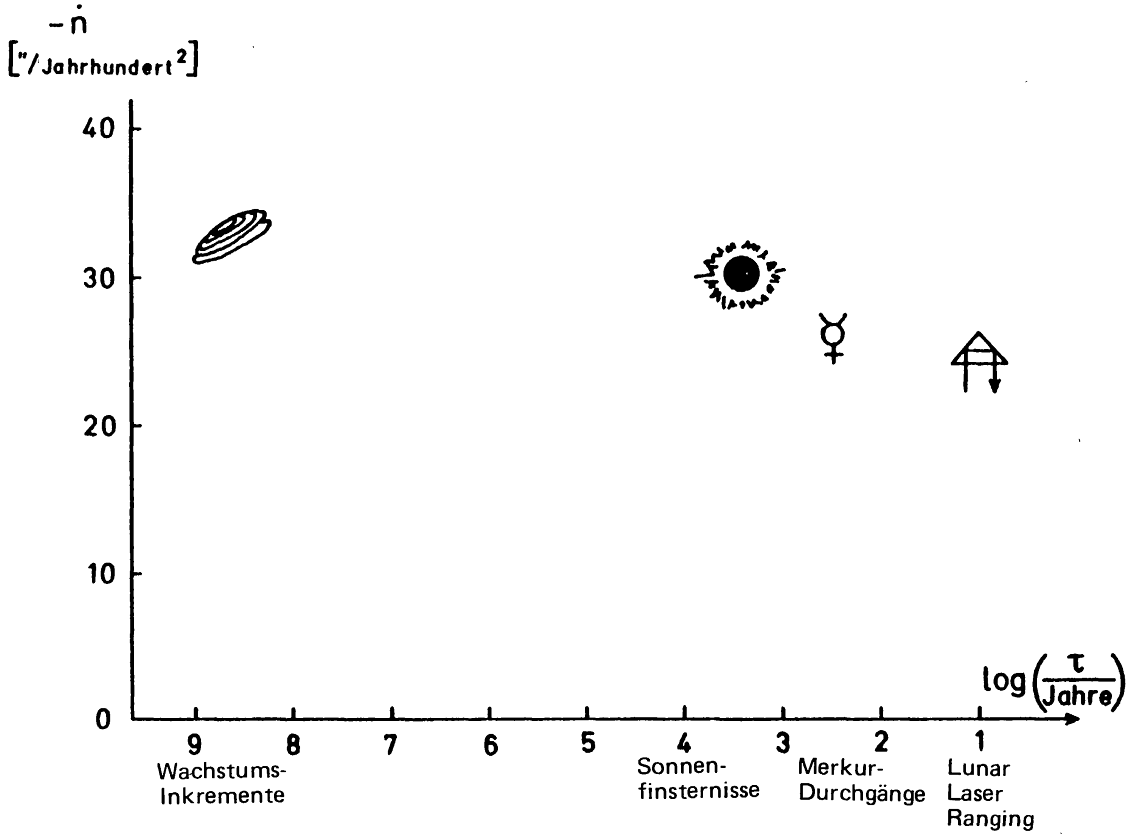

Abb. 1 Die säkulare Änderung der mittleren Bewegung des Mondes ($\dot{n}$) nach Beobachtungen verschiedener Zeitskala τ. Die Resultate der einzelnen Methoden sind bis zu 50% unsicher.

Toksöz, 1978). In umgekehrter Richtung – als Einfluß des Mondes auf seismische Aktivitäten der Erde – ist ein so klarer Zusammenhang bisher nicht gefunden worden. Immerhin scheint er in Einzelfällen evident zu werden, wie z.B. bei den Ausbrüchen des Vulkans La Soufrière auf der karibischen Insel St. Vincent (Science News, 1979).

Die Einführung neuer Beobachtungstechniken hat in Richtung kürzerer Zeitskalen entscheidende Fortschritte gebracht. Zunächst konnte die astronomische Definition der Zeit durch die Atomzeit abgelöst werden. Die Astronomen brauchen für die Jahre, für die diese Zeit zur Verfügung steht, nicht mehr akrobatische Klimmzüge machen, um sich wie weiland der Baron von Münchhausen am eigenen Zopf aus dem Sumpf zu ziehen, sprich, aus zeitartigen Beobachtungen sowohl deren Verbesserung als auch gesuchte Effekte abzuleiten. Die direkte Beobachtung der Erdrotation ist damit sehr vereinfacht worden, jedoch bringt dies wegen der schon geschilderten Irregularitäten von mindestens Jahrzehnten Zeitskala vorläufig noch keinen Beitrag für unser Problem. Hingegen würde diese bessere Zeitdefinition bei der Mondbeobachtung dann etwas nutzen (nämlich den Merkur ersetzen), wenn letztere viel genauer sind als die klassischen astrometrischen Messungen. Sie müssen soviel genauer sein, daß die Kürze der Zeitspanne im Vergleich zu den Jahrhunderten teleskopischer Beobachtung ausgeglichen wird (da es sich darum handelt, aus gemessenen Winkeln eine Winkel b e s c h l e u n i g u n g zu ermitteln, geht es um das Verhältnis der Quadrate der Zeitspannen $\approx$ (2,5 Jahrhunderte: 1 Dekade)^2 $\approx$ 600!)

Eine solche neue Technik der Mondbeobachtung gibt es tatsächlich, nämlich die des „Lunar Laser Ranging". Die Darstellungsreste der Laufzeiten von irdischen Laserblitzen zu Retroreflektoren auf dem Mond und zurück liegen inzwischen unter 0,5 m, das entspricht von der Erde aus einem Winkel von 0".0002! Unter den vielen Parametern, die aus diesen Messungen simultan bestimmt werden können (und müssen, wenn die Genauigkeit nicht verschenkt werden soll), befindet sich auch die nicht-himmelsmechanische Änderung der Mondbahn, die wir der Gezeitenreibung zuschreiben. Sie kommt aus diesen Beobachtungen einer knappen Dekade innerhalb von ± 50% mit demselben Wert heraus wie aus den ganz andersartigen Methoden über gänzlich andere Zeitskalen (Calame und Mulholland 1978)! Nach Williams et al. (1978) ist $\dot{n} = (-24 \pm 4)''/(\text{Jahrhundert})^2$ im Vergleich zu der Zahl 30 ± 3 von Stephenson (1978).

6. Die Natur der Wechselwirkung Erde – Mond

Selbst wenn man den im Prinzip bereits geschilderten Prozeß der Gezeitenreibung für den zur Erklärung der beobachteten Befunde am besten geeigneten hält, wäre damit doch nur ein sehr begrenzter Erkenntnisstand erreicht. Man könnte ihn vergleichen mit frühen Überlegungen zur Theorie des Sternaufbaus, bei denen man z.B. eine Engiequelle im Innern postulierte und dann die Konsequenzen für den Aufbau abgeleitet wurden. Was fehlte, war eben die Physik der Energieerzeugung, oder besser der Umwandlung von Masse in Strahlungsenergie. In unserm Fall fehlt noch das genaue Verständnis des „wo", „wie" und vor allem „wieviel" des Drehimpulstransfers von der Erde zum Mond!

Der wissenschaftlichen Fairneß halber möchte ich hier zunächst auch noch andere Prozesse erwähnen, die als Alternative für die (oder zusätzliche Effekte neben der) Gezeitenreibung diskutiert wurden und werden. Hier seien zunächst solche Theorien genannt, die überhaupt keinen Drehimpulsaustausch zwischen Erde und Mond annehmen. So schlug v. Oppolzer (1884) vor, daß die Aufsammlung von interplanetarem Staub die Bewegungen im Erde-Mond-System beeinflussen könnte; u.a. würde das Trägheitsmoment der Erde zunehmen und die korrespondierende Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit eine Beschleunigung des Mondumlaufs vortäuschen. Heute wissen wir, daß die Dichte im erdnahen interplanetaren Raum 5 Zehnerpotenzen kleiner ist als v. Oppolzers Wert. Später wurde eine Änderung des Trägheitsmoments aus inneren geophysikalischen Gründen ins Auge gefaßt. Es mußte sich dabei natürlich um so etwas wie eine Expansion der Erde handeln, die u.a. die Trennung der Kontinente erklären sollte. Diese Vorstellung erfuhr eine Neubelebung, als die Diracsche Hypothese der Änderung der Gravitationskonstanten von Jordan (1966) ausgearbeitet und auf die Geophysik angewandt wurde. Natürlich können wir eine gewisse Änderung des Trägheitsmoments nicht ausschließen, im Gegenteil, die Anpassung der Erde an ihre verlangsamte Rotation wird sogar mit Sicherheit die Abplattung etwas vermindern und damit die Winkelgeschwindigkeit etwas weniger stark abnehmen, als es sonst der Fall wäre. Der Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten bindet oder befreit Wasser vorzugsweise in polnahen Zonen; dies und korrespondierende Änderungen des Meeresspiegels (die auch andere Ursachen haben können), beeinflussen das Trägheitsmoment. Aber als überwiegenden Effekt können wir eine Änderung des Trägheitsmoments ohne Variation der Gravitationskonstanten ausschließen, da sie die inzwischen gesicherte reale Veränderung der Mondbahn gar nicht erklärt. Bei zeitlicher Abnahme der Gravitationskonstanten wird sich auch die Mondbahn ändern und zwar im selben Sinne aber nicht Maße wie bei einem Drehimpulsaustausch. Einen Überblick über die geophysikalischen Konsequenzen gibt Wesson (1973).

Hält man die Beobachtungen an Erde und Mond bereits für so sicher, daß man einen

nichtverschwindenden Rest einer Drehimpuls-Gesamtbilanz konstatieren zu können glaubt, so ist der Weg für eine Aufspaltung in zwei Anteile offen, neben dem für die Gezeitenreibung einen, der auf die Änderung der Gravitationskonstanten zurückgeführt wird. Dies ist das Vorgehen von von. Flandern (1975). Obwohl ein hinreichend kleiner Anteil dieser Art nie ganz ausgeschlossen werden kann, bin ich der Meinung, daß vorläufig kein zwingender empirischer Grund besteht, seine Existenz anzunehmen.
Gehen wir nunmehr zu Vorstellungen über, die eine echte Drehimpulsänderung der Erde implizieren. Da sich unsere Beobachtungen nur auf einen bestimmten Teil der Erde beziehen, nämlich ihre Kruste, kommt es eigentlich nur auf die Änderung der Rotation dieses Teils der Erde an. Austausche von Drehimpuls innerhalb der Erde sind durchaus möglich, z.B. von Kruste und Mantel mit dem Kern vermittelt durch Magnetfelder, oder zwischen Kruste und Hydrosphäre bzw. Atmosphäre durch mechanische Reibung. Letztere verursachen jährliche, nahezu periodische Schwankungen der Erd(-Krusten-)Rotation, können jedoch nicht das säkulare Verhalten beeinflussen, da dann immer größere Relativbewegungen zwischen den verschiedenen Komponenten der Erde entstehen würden. Außer Gezeiteneffekten könnte die Wechselwirkung des Erdmagnetfeldes mit dem interplanetaren Plasma die Erdrotation bremsen, jedoch scheint dieser Prozeß wenig effektiv zu sein (Munk und MacDonald, 1960, S. 227).

Wenden wir uns den Gezeitenwechselwirkungen zu, so wurde von Holmberg (1958) eine Idee Kelvins aufgegriffen, nämlich die Wirkung der solaren Gezeitenkräfte auf eine mit Sonnenzeit um die Erde laufende Luftdruckwelle. Die Phasenlage ist so, daß sich ein beschleunigendes Drehmoment von $3 \cdot 10^{22}$ dyn·cm ergibt, das jedoch mehr als eine Zehnerpotenz unter dem hier in Rede stehenden liegt (Munk und MacDonald, 1960, S. 205). Holmberg dachte an ein mittleres Gleichgewicht über lange Zeiten zwischen der bremsenden gravitativen Gezeitenreibung und dem beschleunigenden Atmosphäreneffekt. Da die Luftdruckwelle jedoch sicher nicht gravitativen, sondern thermischen Ursprungs ist (Volland und Mayr, 1974), ist diese Vorstellung kaum aufrechtzuerhalten. Für die schon skizzierte Gezeitenreibung im Erde-Mond-System, bei der auch die wechselwirkenden Deformationen der Erde durch die Gezeitenkräfte des Mondes erzeugt werden, bleiben noch zwei Möglichkeiten ihrer Realisierung, die allerdings wie bisher nicht vollkommen disjunkt sind, sondern nur im Sinne eines „stark überwiegend" voneinander getrennt werden können: die Gezeiten der festen Erde und die der Ozeane.
Die Gezeiten der festen Erde sind zwar in ihren Feinheiten starken regionalen Variationen unterworfen, würden es jedoch am ehesten erlauben, für globale Zwecke wie dem hier verfolgten in einfacher Weise zusammengefaßt zu werden. Dabei setzt man die Deformation der wirkenden Kraft proportional, jedoch mit einer gewissen Phasenverschiebung erfolgend. Die Größe der Deformation kann aus Gravimetermessungen (Melchior, 1978) und neuerdings sogar direkt geometrisch aus VLBI-Messungen erschlossen werden; an ihr ist jedenfalls größenordnungsmäßig nicht zu deuteln. Es handelt sich bei der stärksten, der M_2-Tide, um ein Auf und Ab der festen Erde von einigen Dezimetern. Die Schwierigkeiten liegen in der Phasenverschiebung. Die Messungen schienen einige Grad zu erlauben und $6^\circ - 8^\circ$ braucht man, um den beobachteten Wert des Drehimpulstransfers zu verstehen. Dieser Phasenunterschied läßt sich natürlich auch als Funktion gewisser elastischer und rheologischer Parameter der Erde darstellen, die für die Zeitskalen der Gezeitenkräfte (12^h und mehr) gültig sind. Solange man den Bereich der möglichen Werte dieser Parameter noch für sehr ausgedehnt hielt, ließ sich die Gezeitenreibung als ein Phänomen der direkten Wechselwirkung der festen Erde mit dem Monde interpretieren. Dies hatte die äußerst angenehme Folge, daß die Deformationen der Erde eine sehr

einfache analytisch angebbare Form haben. Darauf basieren die himmelsmechanischen Langzeitintegrationen, die ich schon erwähnt hatte.

Die immer stärker gewordene Kritik an dieser Vorstellung läßt sich so zusammenfassen:

A) Selbst die so vielen Störeinflüssen unterworfenen gravimetrischen Messungen stützen die Vorstellung nicht, wenn man sie sinnvoll auswählt, d.h. wenn man Tiden betrachtet, die von gleichen Meeresgezeiten kaum beeinflußt werden und wenn man Stationen im Innern von großen Kontinenten Priorität gibt (Bonatz, 1979).

B) Für Perioden bis zur längsten Eigenschwingung der Erde – 54^m – kennt man aus seismischen Registrierungen die elastischen Eigenschaften recht gut. Es erscheint außerordentlich unwahrscheinlich und wäre überhaupt nicht zu verstehen, wenn bei einem Schritt in der Frequenz bzw. Periode um eine Größenordnung (nämlich von 54^m zu $12^h\ 25^m$) die charakteristischen Parameter so drastisch anders sein würden, wie sie es sein müßten, um die beobachtete Gezeitenreibung mit den (direkten) Gezeiten der festen Erde erklären zu können (Zschau 1979). Unter realistischen Voraussetzungen ergeben sie nur etwa 1% des beobachteten Effekts.

7. Ozeanische Gezeiten

Ich möchte jetzt den Prozeß schildern, der meine Wahl ist, wenn die Gezeitenreibung erklärt werden soll. Es sind, dem Vorschlag Kants entsprechend, die ozeanischen Gezeiten. An Beobachtungen lag und liegt vor ein großer Korpus von Gezeitenamplituden an den Küsten, im besondern für Hafenorte. Was früher gänzlich fehlte und auch heute überwiegend nur für flache Randmeere vorhanden ist, sind Geschwindigkeitsmessungen. Es fehlen immer noch Messungen inmitten der Ozeane, abseits von den störenden Details der vielfältig strukturierten Küsten. Bis zu einem gewissen Grade können sie durch die Messungen an isoliert aus der Tiefsee aufsteigenden Inseln ersetzt werden. Solche Inseln – wie die des mittelatlantischen Rückens – sind sozusagen große Pegelstangen für den Ozeanographen.

Bereits seit den Anfängen der Gezeitenregistrierungen (vor allem durch die nautisch sehr interessierten Engländer) war die große Komplexität der Meeresgezeiten bekannt, die insbesondere gegenüber dem Mond jede beliebige Phase haben können. Es war daher zwar möglich, aber keineswegs erwiesen, daß der Mittelwert über alle Ozeane gerade den gesuchten Effekt ergeben würde.

Neuderdings wird allerdings versucht, aus der gravitativen Wirkung der ozeanischen Gezeiten auf künstliche Erdsatelliten die entsprechende Wirkung auf den Mond zu erschließen. Die Ergebnisse sprechen ebenfalls für die ozeanischen Gezeiten als die entscheidende Wechselwirkung (Goad and Douglas, 1978).

Die ersten Schritte vom rein qualitativen Argumentieren zu quantitativen Abschätzungen setzten schon eine gewisse Einsicht in die Wechselwirkungen voraus, die eine Rolle spielen. Zum einen ist es die Wechselwirkung Mond – Wassermassen, wobei die Gravitation die zuständige Kraft ist; zum andern wird die Wechselwirkung Wasser – feste Erde durch die Bodenreibung vermittelt. Für beide Wechselwirkungsarten kann man im Prinzip die Nettoeffekte, d.h. die räumlichen und zeitlichen Mittelwerte berechnen und mit dem beobachteten gobalen Effekt vergleichen. Die gravitative Wechselwirkung sollte in den Weiten der großen Ozeane den größten Beitrag bringen, während die Bodenreibung infolge der viel größeren Geschwindigkeiten in den flachen Randmeeren nur dort effektiv auftritt. Damit ergibt sich als dritte Berechnungsmethode die Kontrolle des Flusses der interessierenden Größen durch die Grenzen zwischen den Ozeanen und den Randmeeren. Solche interessierenden Größen sind mindestens Energie und Drehimpuls. Selbst in einem einfachen koplanaren Modell, in dem der Mond in einer Äquatorbahn umläuft, kann man allenfalls die Erdrotation durch e i n e Größe beschreiben, die alle anderen festlegt (z.B. die Rotationsenergie), nicht aber die Mondbahn. Letzterer muß man wenigstens zwei Freiheitsgrade zubilligen, z.B. Energie und Betrag des Drehimpulses. Daß bisher fast ausschließlich Energiebetrachtungen angestellt wurden, ist auch noch aus einem anderen Grunde zu kritisieren: der Drehimpuls wird als spezifisch makroskopische Größe auch makroskopisch erhalten und verschwindet nicht durch Dissipation oder Abstrahlung im Mikroskopischen. Das liegt im wesentlichen an der Winzigkeit der Plankschen Konstante h im Vergleich zu makroskopischen Drehimpulsen. Beim Drehimpuls kann also im zeitlichen Mittel ein konstanter Durchfluß ohne Verlust oder Gewinn durch die Wassermassen verlangt werden, da nur so die Ozeane stationär bleiben können. Damit sind die Drehimpulsbilanzen zumindest im Prinzip einfacher als die Energiebilanzen. Bei letzteren ist zudem besonders streng darauf zu achten, auf welches Koordinatensystem sie sich beziehen.

Einfach wegen des Vorhandenseins empirischer Daten bezog sich die erste quantitative Berechnnung von Taylor (1919) auf die Energiedissipation der Gezeiten in der Irischen See. Später befaßte man sich besonders auch mit der Beringsee. Diese ersten Abschätzungen führten auf die gesuchte Größenordnung und mehr konnten sie nicht bringen. Während bei der festen Erde die physikalische Situation das Unsichere war, die analytische Beschreibung der Phänomenologie jedoch vergleichsweise einfach angesetzt werden durfte, kann man bei den ozeanischen Gezeiten cum grano salis sagen, daß die Physik klarer ist, jedoch die ungeheure geometrische Komplexität des Meeresbodens jede realistische analytische Behandlung unmöglich gemacht hat.
Der dadurch verursachte Stillstand in den Bemühungen um das Verständnis der ozeanischen Gezeiten (noch nicht der Gezeitenreibung – wir werden sehen, daß der Aufwand dafür noch höher ist) wurde natürlich erst durch das Aufkommen der großen Rechner beendet. Die von Hansen (1956) und später von seinen Mitarbeitern in Hamburg entwickelten Programme integrieren die hydrodynamischen Differentialgleichungen in beliebig geformten Meeresgebieten. Hierbei werden neben den Gezeitenamplituden ζ aus Gründen der Rechenkapazität fast immer vertikal gemittelte horizontale Geschwindigkeitskomponenten u, v (in Ost- bzw. Nordrichtung) verwendet.

Die praktisch verwendeten Gleichungen lauten dann:

Bewegungsgleichungen:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R\cos\varphi}\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{g}{R\cos\varphi}\frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - 2\omega \sin\varphi\, v + B_\lambda + T_\lambda = K_\lambda$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{R}\frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{g}{R}\frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + 2\omega \sin\varphi\, u + B_\varphi + T_\varphi = K_\varphi$$

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R\cos\varphi}\left(\frac{\partial}{\partial \lambda}(h+\zeta) + \frac{\partial}{\partial \varphi}(h+\zeta)\, v \cos\varphi\right) = 0$$

Hierin sind außer den schon genannten ζ, u, v, R der Erdradius; φ, λ geographische Breite und Länge; ω die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation, g die Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche und h die mittlere Meerestiefe an der betrachteten Stelle. B, T, K bedeuten die Terme der Bodenreibung, der turbulenten Viskosität und der Gezeitenkraft von Mond und/oder Sonne, und zwar jeweils in den beiden Komponenten entlang der Breitenkreise bzw. der Meridiane. Der Einfluß der Gezeiten der festen Erde auf die Ausbildung der Meeresgezeiten wird in erster Näherung berücksichtigt, indem man die für die starre Erde gültigen Beschleunigungen mit der Kombination $\gamma = 1+k-h$ der Loveschen Zahlen h und k multipliziert (hier $k = 0.302$, $h = 0.612$, $\gamma = 0.690$). (Durch ein teilweises Nachgeben der festen Erde in Richtung einer Äquipotentialfläche werden die Kräfte um den Faktor γ reduziert.) Die ersten drei Terme der Bewegungsgleichungen entsprechen der elementarsten Hydrodynamik: zwei Trägheitsterme und die Druckgradientkraft. Der vierte Term ist die Corioliskraft. Für uns besonders wichtig sind B und K. Die Gezeitenbeschleunigung K (d.h. genauer, ihre horizontalen Komponenten), könnte im Prinzip mit den vollen Momentanwerten in einem bestimmten Zeitabschnitt eingesetzt werden. Das würde aber schon richtige Startwerte für den Beginn voraussetzen und im übrigen ein sehr spezielles Resultat geben. Man pflegt daher die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne gemäß den wichtigsten Frequenzen in den Bahnbewegungen von Mond und Erde in Reihen zu entwickeln. Zu jeder Frequenz gehören dann entsprechende Partial-Tiden, deren Beschleunigungen gesondert in die rechten Seiten der Bewegungsgleichungen eingesetzt werden können. Der größte Term, die M_2-Tide, stellt die mittleren halbtägigen Mondgezeiten dar. Wir werden uns im folgenden ausschließlich mit ihr befassen; es bedeutet aber keinerlei Erschwerung, die Rechnungen für andere Tiden durchzuführen. Gesucht sind periodische Lösungen der Gleichungen, wobei die Normalkomponente der Geschwindigkeiten an den Küsten verschwinden soll. Bei der numerischen Behandlung kann man z.B. mit $u=v=\zeta=0$ in allen Flächenelementen eines Gitternetzes beginnen und erhält nach einigen Perioden der Kraft Variationen, die mit hoher Genauigkeit wiederkehren, die Stationarität der Lösungen ist damit erreicht. Für die für uns so wichtige Bodenreibung wird das empirische Gesetz für die Beschleunigung

$$(B_\lambda, B_\varphi) = \vec{B} = \frac{r|\mathbf{v}|\mathbf{v}}{(h+\zeta)} \qquad (\mathbf{v} = (u,v))$$

mit $r = 0.003$ verwendet. Dieses Gesetz ist mit seiner Nichtlinearität einerseits mathematisch sehr unangenehm, andererseits erhält man nur so nichtverschwindende zeitliche Mittelwerte der Drehmomente zwischen Wasser und fester Erde! Ohne Reibung oder mit einem linear von der Geschwindigkeit abhängigen Reibungsgesetz kann man die hydrodynamischen Gleichungen auf die Form der sogenannten Laplaceschen Gezeitengleichungen bringen, indem man die plausible Zusatzannahme macht, daß u, v, ζ wie die Kraft rein harmonische Schwingungen mit der Periode der Kraft ausführen. Dann entfällt die Abhängigkeit von der Zeit und es sind nur noch Phasen und Amplituden in Abhängigkeit vom Ort zu bestimmen. Diese für viele rein ozeanographische Zwecke gute Approximation würde uns ein Nullresultat bringen, weil auf sie die Kritik anwendbar ist, die im Prinzip schon von v. Oppolzer geäußert wurde: ein rein harmonischer Verlauf der Bodenreibung gäbe als zeitliches Mittel Null und damit kein Netto-Drehmoment!
Im mittleren Drehmoment der gravitativen Wechselwirkung Wasser – Mond gehen die mittleren Wassertiefen nicht mehr ein, da das Zeitmittel der Kräfte verschwindet.

Es bleibt

$$L = \int_{\substack{\text{Ozean-}\\\text{fläche}}} \int_{\substack{\text{Gezeiten-}\\\text{periode}}} \rho \, (R\cos\varphi) \cdot \zeta \cdot K_\lambda \; dt \; dq$$

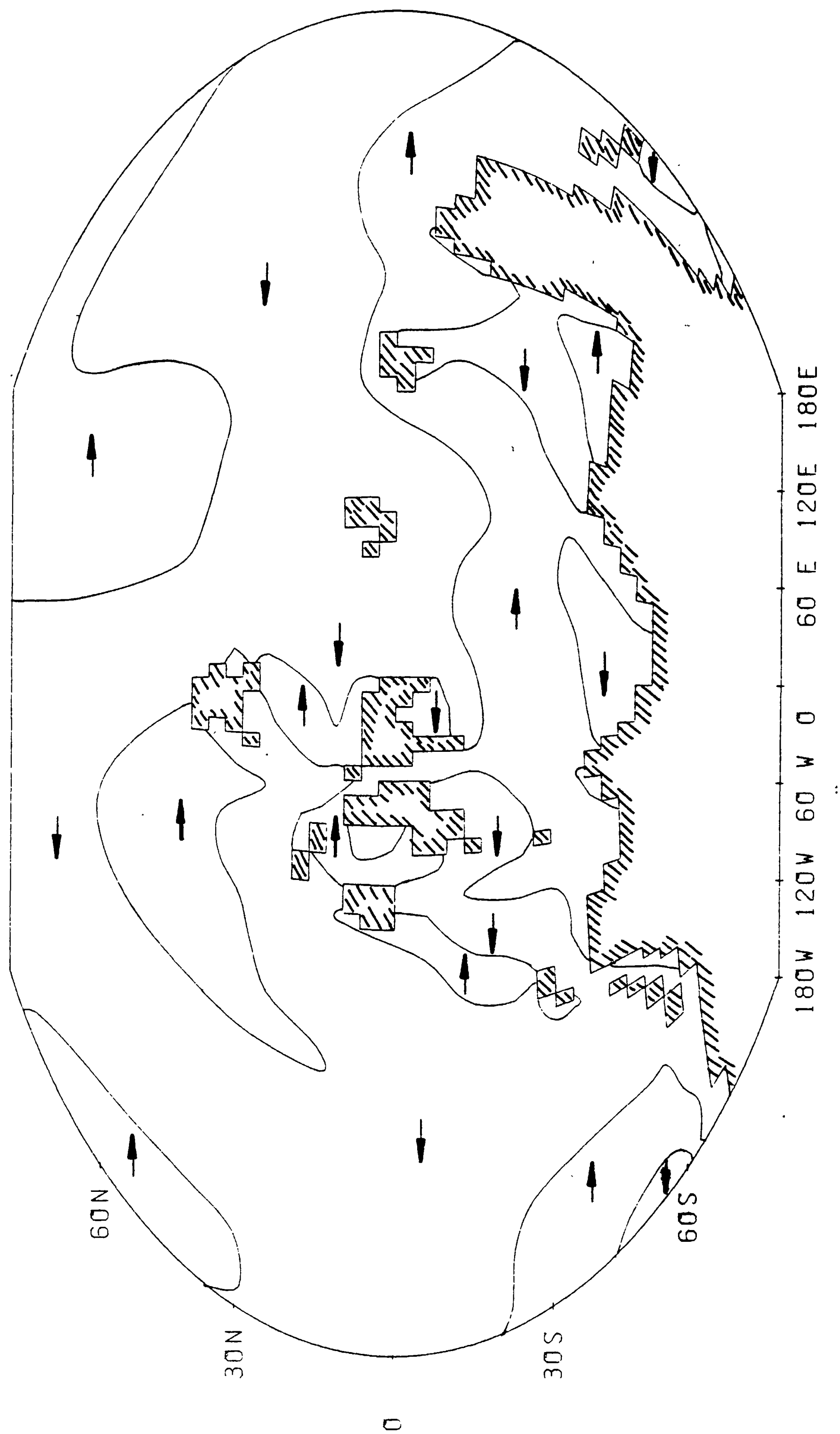

Abb. 2. 4°-Modell der M_2-Tide im mittleren Silur (vor 420 Mill. Jahren). Eingetragen sind die Grenzen der Meeresgebiete, in denen die Wechselwirkung Mond-Wasser im Mittel über eine Gezeitenperiode einen bremsenden (Pfeil nach links) oder einen beschleunigenden (Pfeil nach rechts) Einfluß auf die Rotation der Erde ausübt.

K_λ ist die Gezeitenbeschleunigung, ρ die Dichte des Wassers, dt und dq Zeit- und Oberflächendifferentiale.

Seit einigen Jahren arbeite ich mit J. Sündermann (Institut für Meereskunde der Universität Hamburg) an der Gewinnung möglichst realistischer Werte der Gezeitenreibung. Als unser wichtigstes Ergebnis für die Gegenwart will ich hier nur das mittlere Drehmoment von

$$L = -4.9 \cdot 10^{23} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$$

nennen, das den astronomischen Werten bestens entspricht, so daß im Rahmen der heutigen Genauigkeiten jedenfalls kein Bedürnis für exotische Alternativen besteht (Sündermann und Brosche 1978). Allerdings bezieht sich unser Wert nur auf die stärkste Partialtide M_2. Die geographischen Verteilungen der Amplituden und Phasen der ozeanographischen Modelle sind sehr kompliziert. Es erfordert eine sonst unübliche Rechengenauigkeit, die Signifikanz des Nettowerts aus den positiven und negativen Beiträgen der räumlichen und zeitlichen Integration zu sichern.

So befriedigend die Darstellung des beobachteten Wert für die Gegenwart auch ist (unser 2000^a-Zeitintervall ist „Gegenwart“), so drängt sich doch sofort die Frage auf, wie weit dieses Resultat in die geologische Vergangenheit übertragen werden darf. Nach Auskunft der Wachstumsrhythmen fossiler Lebewesen ist zwar auch für Zeiten bis zu einigen 100 Millionen Jahren zurück derselbe Wert der Gezeitenreibung akzeptabel, aber keineswegs zwingend, sondern mindestens mit der Bandbreite eines Faktors 2, ganz abgesehen von den vielen offenen Fragen, die bei der Interpretation dieser Daten bestehen. Von der theoretischen Seite her wären wir bei der festen Erde zu der Annahme einer nur geringen Variation innerhalb eines solchen Zeitraums berechtigt, jedoch ganz und gar nicht bei den Gezeiten der Ozeane. Denn diese hängen entscheidend von der geometrischen Form der Meeresbecken ab, und die Form hat sich innerhalb von 250 Millionen Jahren drastisch verändert: nach der inzwischen gesicherten Kontinentaldrift-Hypothese Wegeners, dessen 100. Geburtstag wir dieses Jahr begehen, hat sich der ganze Atlantik erst seit dieser Zeit geöffnet! Was man also eigentlich tun müßte, wäre dieses: (1) mit den für einen Zeitpunkt – zuerst die Gegenwart – gefundenen Werten die Erdrotation und die Mondbahn für eine „kleine“ Zeitspanne zurückrechnen, (2) mit den neuen allgemeinen Konstanten (Frequenzen und Amplituden der Gezeitenkräfte) und der Form der Meeresbecken zu diesem Zeitpunkt wiederum hydrodynamische Rechnungen anstellen, die die Effekte der Gezeitenreibung zu diesem Zeitpunkt geben. Und so fort. Natürlich kennt man die Geometrie bzw. Bathymetrie der alten Meere bei weitem nicht so genau, wie wir es uns wünschen würden, aber man weiß doch sehr viel mehr als gar nichts (Slater, 1978). Für die jüngste Vergangenheit von einigen 100 000 Jahren kann man die Kontinentaldrift noch ganz außer acht lassen und erwartet von der Veränderung des Meeresspiegels in extremen Eiszeiten und Warmzeiten die größtmögliche Variation der Gezeitenreibung. Wir haben den Meeresspiegel im Modell um 100 m abgesenkt, um eine extreme Eiszeit zu simulieren. Das Ergebnis war nur wenige %, also nicht signifikant vom heutigen verschieden (Brosche und Sündermann 1979). Für länger zurückliegende Epochen mußten wir uns mit einfachen 2-Tiefen-Modellen begnügen, in denen jeweils eine bestimmte mittlere Tiefe für Schelf- und für Tiefseegebiete angesetzt wurde. Dieselbe Vergröberung gibt für die heutigen Ozeane einen um 37% kleineren Gesamtwert des mittleren Drehmoments.

Abb. 2 zeigt die Verteilung der bremsenden und beschleunigenden Meeresgebiete für ein Modell, dessen geologische Epoche unter den bisher untersuchten die älteste ist, nämlich das mittlere Silur. Die Kartengrundlagen stammen von Ziegler et al. (1979). Es ist insofern besonders interessant, als die Kontinentverteilung von denjenigen zwischen der

Tabelle 1

Geologische Epoche	Zeit (Mill. Jahre)	Drehmoment (-10^{23} dyn cm)	Tiefenverteilung	Winkelgeschw. der Erdrotation	Amplitude der Gezeitenkraft
				relativ zum heutigen Wert	
Gegenwart	0	4.9	Detailliert	1	1
Eiszeit	0.2	4.5	Detailliert	1	1
Gegenwart	0	3.1		1	1
Oberkreide	70	3.1	Schematisch	1.01	1
Oberperm	240	2.0	(2 Tiefen)	1.04	1.002
Mittl. Silur	420	3.6		1.08	1.003

Gegenwart und der Pangäa des Perm drastisch abweicht: statt der vorwiegend meridionalen Anordnung der Landmassen, die eine freie Ausbildung von Wellen rund um die Erde z.B. heute auf kleine Bereiche um die Antarktis beschränkt, gibt es eine große Landmasse um den südlichen Pol und diverse kleine Kontinent-„Inseln".

Die Ergebnisse für verschiedene Modelle sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. An ihnen ist zunächst bemerkenswert, daß die mittleren Drehmomente weniger als einen Faktor 2 variieren. Besonders interessant ist die Feststellung, daß die Drehmomente auch deutlich kleiner sein können als das heutige – was bei idealisierten Modellen mit zwei Gezeitenbergen unmöglich wäre! Nimmt man die Zahlen als repräsentative Mittelwerte für die großen Zeitintervalle der Tabelle, so kann man sogar die in den paläontologischen Daten angedeutete Abschwächung der Gezeitenreibung zwischen 100 und 300 Mill. Jahren in ihrem relativen Verlauf „darstellen". Eine solche Interpretation ist aber vorläufig noch sehr verfrüht. Unter anderem haben numerische Experimente mit Schließung und Öffnung von Landbrücken eine starke Abhängikeit der Resultate von solchen topographischen Details ergeben. Immerhin scheinen diese Resultate Möglichkeiten zu eröffnen, die krassen Annäherungen Erde-Mond zu einer viel zu wenig zurückliegenden Epoche zu vermeiden oder zu mildern, welche die schematischen Ansätze zwangsläufig ergeben.
Wir sind der Deutschen Forschungsgemeinschaft sehr dankbar für die Förderung, die sie unseren Untersuchungen hat zuteil werden lassen.

8. Ausblick

Unter den vielen Problemen der Berechnung von Paläo-Gezeiten ist zweifellos auf der mehr empirischen Seite die Erfassung der Form der alten Ozeane das wichtigste. Hier erwarten wir keine sprunghafte, aber eine stetige Verbesserung der Situation durch die Akkumulation der vielen Informationen, die aus den Tiefseebohrungen gewonnen werden.

Unter den mehr theoretischen Problemen möchte ich ein bisher noch nicht genanntes hervorheben: die Eigenschwingungen der Ozeane. Wenn eine Situation eintritt, bei der eine Eigenfrequenz der Ozeane mit einer Hauptfrequenz der gezeitenerzeugenden Kräfte zusammenfällt (speziell der M_2-Frequenz von $2\pi/12^h.42$) dann werden wir stärkere Effekte erwarten als außerhalb solcher Resonanzsituationen. Nach Schulte (1979) ist eine der Eigenperioden der gegenwärtigen Ozeane $12^h.2$, also nur wenig unterhalb der heutigen

M_2-Periode von 12.42 Stunden. In nicht allzuferner geologischer Vergangenheit hatte die M_2-Periode diesen Wert, aber ob damals die Ozeane schon diese Eigenfrequenz hatten, wissen wir noch nicht. Wir werden von Fall zu Fall prüfen müssen, ob wir nicht beim diskreten Rückwärtsrechnen eine Resonanz übersprungen haben. Es wird interessant sein zu vergleichen, ob die Resonanzen womöglich etwas mit den sprunghaften Änderungen des Erdmagnetfelds zu tun haben. Man muß auch deutlich sehen und sagen, daß die von uns erfaßte Zeitskala noch nicht an die von Milliarden Jahren herankommt, um die es bei dem „nahen" Zustand geht. Vorläufig ist noch nicht an Modelle für sehr viel ältere Zeiten zu denken. Immerhin möchte ich die geologische Evidenz erwähnen, die für die Existenz von Flachseen seit 3.8 Milliarden Jahren und für eine Hydrosphäre vom Volumen der heutigen seit 2.5, vielleicht schon seit 3.2 Milliarden Jahren spricht (Piper, 1978). Für diese präkambrischen Zeiten wird aus der Ablagerung von Sedimenten zwar auf sehr hohe Gezeitenamplituden geschlossen (z.B. von Brunn und Hobday 1976), jedoch möchte ich den Nachdruck darauf legen, daß es überhaupt für Zeiten bis 3.2 Milliarden Jahre Indikatoren für Gezeiten der heutigen Art gibt, somit auf eine Existenz des Erde-Mond-Systems geschlossen werden kann! Die hohen Amplituden (einige 10m) können auch durch lokale Verhältnisse erklärt werden (Piper 1978). Seit diesen Zeiten gibt es auch keine Anzeichen für die mit einer engen Annäherung des Mondes verknüpften katastrophalen Ereignisse. Wer immer so etwas haben möchte, muß es in die Zeit davor verlegen. Aber auch in dieser Zeit ist nicht jede Hypothese gleichwahrscheinlich; nach dem Vorbilde MacDonald's (1964) sollte z.B. die jetzt gut passende Position des Erde-Mond-Systems im Masse-Drehimpuls-Diagramm der Planeten (Brosche, 1963) nicht ohne Not aufgegeben werden. Ich will mich jedoch dem Thema der Entstehung des Mondes gar nicht weiter nähern, da ich dazu nicht mehr als das schon Gesagte beitragen kann, das nur eine von vielen Randbedingungen darstellt. Es ist auch nicht so, daß nur der e n g s t e Z u s t a n d des Erde-Mond-Systems von großer Bedeutung für die Entwicklung des Systems war. Vielmehr bringt schon die einigermaßen gesicherte Änderung der Erdrotation in der Zeitskala von einigen 100 Millionen Jahren viele wichtige Konsequenzen mit sich. Ich erwähne hier nur die möglichen Korrelationen mit dem Klima und damit mit der Evolution des Lebens (Whyte 1977, Hunt 1979), mit dem irdischen Magnetfeld (Creer 1975) und der Tektonik der Erde (Shaw, 1970). Ein Einfluß auf die Kontinentaldrift wäre nach dem Betrage der dissipierten Energie möglich und nach den Bewegungsrichtungen plausibel, die mittleren Bodenreibungskräfte sind aber um viele Größenordnungen zu klein, um die beobachteten Bewegungen bei Benutzung der bekannten Viskositäten erzeugen zu können (Jordan, 1974; Brosche und Sündermann, 1977).

Literatur

Abkürzung:
TFER = Tidal Friction and the Earth's Rotation (Eds. P. Brosche and J. Sündermann), Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1978

ANDERSON, A.J.: 1978, The Moon and the Planets **19**, 409
BROSCHE, P.: 1963, Z. Astrophys. **57**, 143
BROSCHE, P.: 1977, Die Sterne **53**, 114
BROSCHE, P., SÜNDERMANN, J.: 1977, Symposium „Scientific Applications of Lunar Laser Ranging" (ed. J.D. Mulholland), Reidel, Dordrecht, S. 133
BROSCHE, P., SÜNDERMANN, J.: 1979, IAU-Symp. 82, Time and the Earth's Rotation (Eds. D.D. McCarthy and J.D. Pilkington), Reidel, Dordrecht, S. 317
v. BRUNN, V., HOBDAY, D.K.: 1976, J. Sediment. Petrology **46**, 670
CALAME, O., MULHOLLAND, J.D.: 1978, TFER, S. 43

CHENG, CH.H., TOKSÖZ, M.N.: 1978, J. Geophys. Res. **83,** 845
CREER, K.M.: 1975, in „Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation" (Eds. G.D. Rosenberg and S.K. Runcorn), Wiley, London, S. 293
DARWIN, G.H.: 1879, Phil. Trans. Roy. Soc. London **170,** 447
DARWIN, G.H.: 1880, Phil. Trans. Roy. Soc. London **171,** 713
FELBER, H.J.: 1974, Die Sterne **50,** 82
van FLANDERN, TH.C.: 1975, Mon. Not. R. Astr. Soc. **170,** 333
FORBES, E.G.: 1971, The Euler-Mayer correspondence (1751-1755), MacMillan, New York, S. 21 und 77
GERSTENKORN, H.: 1955, Z. Astrophys. **26,** 245
GOAD, C.C., DOUGLAS, B.C.: 1978, J. Geophys. Res. **83,** 2306
GOLDREICH, P.: 1966, Rev. Geophys. **4,** 411
GOLDREICH, P., SOTER, ST.: 1966, Icarus **5,** 375
GONDOLATSCH, F.: 1953, Veröff. Astr. Rechen-Inst. Heidelberg Nr. 5
HALLEY, E.: 1695, Phil. Trans. Roy. Soc. London **19,** 160
HANSEN, W.: 1956, Tellus **8,** 287
HOLMBERG, E.R.R.: 1952, Mon. Not. R. Astr. Soc., Geophys. Suppl. **6,** 325
HUNT, B.G.: 1979, Nature **281,** 188
JORDAN, P.: 1966, Die Expansion der Erde, Vieweg, Braunschweig
JORDAN, TH.H.: 1974, J. Geophys. Res. **79,** 2141
KOPAL, Z.: 1972, The Moon **4,** 28
LAMBECK, K.: 1979, J. Geophys. Res. **84,** 5651
MACDONALD, G.J.F.: 1964, Rev. Geophys. **2,** 467
MAYER, R.: 1848, Beiträge zur Dynamik des Himmel, Heilbronn, Kapitel 8
MELCHIOR, P.: 1978, The Tides of the Planet Earth. Pergamon Press
MORRISON, L.V.: 1978, TFER, S. 22
MULLER, P.M., STEPHENSON, F.R.: 1975, In „Growths Rhythms and the History of the Earth's Rotation" (Eds. C.D. Rosenberg and S.K. Runcorn) Wiley, London
MUNK, W., MACDONALD, G.J.F.: 1960, The Rotation of the Earth, Cambridge Univ. Press, London
MUNK, W.: 1968, Q.J.R. Astr. Soc. **9,** 352
NEWTON, R.R.: 1972, Medieval Chronicles and the Rotation of the Earth. John-Hopkins-University-Press, Baltimore-London
v. OPPOLZER, TH.: 1884, Astr. Nachr. **108,** 67
PIPER, J.D.A.: 1978, TFER, S. 197
SCHULTE, D.: 1979, Diplomarbeit im Fach Ozeanographie, Univ. Hamburg
Science News (anonymous), 1979, Vol. **116,** 404
SCRUTTON, C.T.: 1978, TFER, S. 154
SHAW, H.R.: 1970, Science **168,** 1084
SINGER, S.F.: 1968, Geophys. J.R. Astr. Soc. **15,** 205
SINGER, S.F.: 1970, Science **170,** 1196
SLATER, J.G.: 1978, Advances in Oceanography (Eds. H. Charnock and G. Deacon), Plenum Press
STEPHENSON, F.R.: 1978, TFER, S. 5
SÜNDERMANN, J., BROSCHE, P.: 1978, TFER, S. 125
TAYLOR, G.: 1919, Phil. Trans. Roy. Soc. London **220,** 1
VOLLAND, H., MAYR, H.G.: 1974, Radio Sci. **9,** 263
WACKERBARTH, A.D.: 1867, Mon. Not. R. Astr. Soc. **127,** 199
WELLS, J.W.: 1963, Nature **197,** 948
WESSON, P.S.: 1973, Q.J.R. Astr. Soc. **14,** 9
WHYTE, M.A.: 1977, Nature **267,** 679
WILLIAMS, J.G., SINCLAIR, W.S., YODER, C.F.: 1978, Geophys. Res. Lett. **5,** 943
ZIEGLER, A.M., SCOTESE, C.R., MCKERROW, W.S., JOHNSON, M.E., BAMBACH, R.K.: 1979, Ann. Rev. Earth Planet. Sci **7,** 473
ZSCHAU, J.: 1978, TFER, S. 62