

Welche Richtung nimmt die Entwicklung unserer Erde?

Von Univ.-Prof. Dr. Max Toperczer, Wien.

Vortrag, gehalten am 8. März 1961.

Wenn wir von der Entwicklung der Erde sprechen wollen, so verstehen wir darunter die Entwicklung des physikalischen Systems, als das allein die Erde physikalischer Betrachtung zugänglich ist. Diese physikalische Betrachtungsweise ist aber die einzige, die es uns gestattet, aus der Vorgeschichte und dem gegenwärtigen Zustand eines physikalischen Systems sein weiteres Verhalten, also seine Zukunft in einem mehr oder minder beschränktem Umfang vorherzusagen.

Die Lebensgeschichte eines physikalischen Systems ist abhängig von den ihm zur Verfügung stehenden Energiemengen und der Art, in der diese verbraucht werden. Die Energiequellen der Erde sind mannigfacher Art und mit ihnen werden wir uns nun in erster Linie zu beschäftigen haben. Im besonderem Maß sind wir aber an einem Teilproblem unseres Fragenkomplexes interessiert: an der Frage nach der Veränderlichkeit oder Unveränderlichkeit der physikalischen Bedingungen an

der Erdoberfläche, weil davon in erster Linie die Möglichkeit organischen Lebens abhängt.

Im Gegensatz zur Sonne ist die Erde ein passiver Himmelskörper, d. h. sie verfügt im Vergleich zu den sonnenähnlichen Himmelskörpern über keine nennenswerten eigenen Energiequellen. Die sonnenähnlichen oder aktiven Himmelskörper erzeugen durch Verschmelzung leichter Atomkerne, vorwiegend Wasserstoffkerne, gewaltige Energiemengen, sie sind auch die Laboratorien, in denen die schwereren Elemente aufgebaut werden. Die im Vergleich zu den sonnenähnlichen Himmelskörpern geringen Energiequellen der passiven Himmelskörper beruhen auf einem anderen atomaren Vorgang, auf dem Zerfall schwerer, instabiler Atomkerne. Kernaufbau und Kernspaltung sind die beiden großen Prozesse, auf denen das kosmische Geschehen beruht.

Über die Vergangenheit der Erde gibt uns über weite Zeiträume die Geologie einen sehr eingehenden Aufschluß, je weiter wir aber in die Vergangenheit zurückgehen, umso dürftiger wird auch diese Quelle der Erdgeschichte und muß schließlich wieder durch physikalische Methoden ersetzt werden, die uns auch eine einwandfreie Zeitskala für die Datierung der geologischen Befunde liefert. Es sind dies die auf der Beobachtung des radioaktiven Zerfalls beruhenden Methoden der Altersbestimmung von Gesteinen und darauf aufbauend

schließlich eine Methode zur Bestimmung des Gesamtalters der Erde.

Altersbestimmungen sind unmittelbar nur bei Gesteinen möglich, die radioaktive Elemente enthalten. Die wichtigsten dieser ins Gestein eingebauten Atomuhren, wie man sie auch nennen könnte, sind die spontan zerfallenden Atome von Uran und Thorium, ein Kalium- und Rubidiumisotop. Es gibt natürlich auch noch andere radioaktive Isotope, doch können nur solche für Zwecke geologischer Altersbestimmung herangezogen werden, die genügend langlebig sind und auch genügend häufig als Gesteinsbaustein auftreten. Besonders wichtig ist die Langlebigkeit, denn diese Atomuhren müssen eine weit größere Gangdauer haben, als es das bisherige Alter der Erde ist, da wir dieses sonst mit ihrer Hilfe gar nicht bestimmen könnten. Die Lebensdauer eines solchen radioaktiven Materials mißt der Physiker durch Angabe der Halbwertszeit; es ist dies jene Zeit, in der gerade die Hälfte des ursprünglich vorhandenen radioaktiven Materials sich in seine Folgeprodukte umgewandelt hat. Das gewöhnliche Uran hat z. B. eine Halbwertszeit von 4.5 Milliarden Jahren. Das bedeutet, daß von 238 g Uran in der angegebenen Zeit sich 119 g in 103 g Uranblei und 16 g Helium, die stabilen Endprodukte des ganzen atomaren Zerfalls, umgewandelt haben. Ähnlich lange oder noch längere Halbwertszeiten

haben die anderen oben angeführten radioaktiven Testelemente.

Die Altersbestimmung erfolgt nun durch Messung des Verhältnisses eines stabilen Endproduktes zu der noch vorhandenen Menge des aktiven Körpers, im eben angeführten Beispiel, also der Menge des durch den Zerfall entstandenen Bleis zu dem noch vorhandenen Uran. Auf diese Weise lassen sich Altersangaben über einzelne Mineralien machen und damit auch über das Alter der Gesteinskörper, in denen sie auftreten und die aus ihnen aufgebaut sind. Man begnügt sich heute nicht mit Altersbestimmungen nach einer einzigen Methode, sondern betrachtet nur derartige Ergebnisse als gesichert, die nach mindestens zwei unabhängigen Bestimmungen annähernd gleiche Altersangaben geliefert haben.

So hat man gefunden, daß der der Paläontologie zugängliche und durch sie einordenbare Zeitraum der Erdgeschichte etwa 600 Millionen Jahre umfaßt, die ältesten, bis jetzt aufgefundenen Gesteine haben ein Alter von rund 3 Milliarden Jahren, sind also fünfmal so alt als die ältesten sicher erkennbaren Zeugen des Lebens auf der Erde. Doch ergeben auch diese Werte noch nicht das Alter unseres Planeten.

Unsere radioaktiven Uhren ergeben natürlich nur so lange einwandfreie Altersangaben, als sie in ihrem stofflichen Bestand unverändert geblie-

ben sind. Alle Umwandlungen, seien sie mechanischer oder chemischer Art, bei der die stoffliche Zusammensetzung verändert wurde, müssen ihre Angaben verfälschen, weil wir unsere Zeitbestimmungen ja auf das Verhältnis bestimmter Elemente in den Testmineralien gründen. In den Urzeiten der Erdgeschichte aber wurde der Stoffbestand dauernden und gewaltigen Veränderungen unterworfen. Die Erde hatte damals keine feste Kruste wie heute, diese wurde immer wieder aufgeschmolzen und zerstört und damit eben gebildetes Gestein aufgelöst und in den damals unendlich lebhafteren inneren Kreislauf der Materie einbezogen. Die ältesten Gesteine sagen daher nur etwas über den Zeitpunkt aus, zu dem sich zum erstenmale eine annähernd beständige äußere Hülle der Erde bilden konnte.

Wollen wir darüber hinaus etwas über das Alter der Erde erfahren, so müssen wir dazu andere Hilfsmittel anwenden. Man nimmt an, daß zum Zeitpunkt der Geburt der Erde keine nennenswerten Mengen radiogener Bleiisotope im stofflichen Bestand des neugeborenen Planeten vorhanden waren, wohl aber das gewöhnliche Blei, das nicht radioaktiven Ursprungs ist. Aus dem Verhältnis der verschiedenen Bleiisotope zum gewöhnlichen Blei in Mineralien ganz verschiedenen Alters kann man nun jenen Zeitpunkt bestimmen, zu dem kein radiogenes Blei vorhanden war, und

findet so als Alter der Erde einen Wert von 4.2 bis 4.5 Milliarden Jahren.

Damit sind wir zu dem Zeitpunkt gekommen, zu dem die Erde erstmals als deutlich abgesonderte Masse in der Geschichte des Universums erscheint. Natürlich war sie auch vorher schon vorhanden, aber noch in Verbindung mit ihrem Mutter- oder ihren Schwestergestirnen, ebenso wie der Embryo schon im Mutterleib eine Eigenexistenz hat, aber noch in stofflicher Abhängigkeit zum mütterlichen Organismus steht. Erst nach der Geburt beginnt die stoffliche Selbständigkeit.

Mit einem physikalisch einwandfrei bestimmten Wert des Alters der Erde haben wir einen fundamentalen Ausgangspunkt für unsere Überlegungen gewonnen, da wir ja die Kenntnis der Vergangenheit benötigen, um auf die Zukunft in vernünftigen Grenzen schließen zu können. Doch wollen wir schon hier auf einen Umstand hinweisen: bei geophysikalischen Betrachtungen, die die Erde als Ganzes betreffen, bekommen wir es natürlich immer mit Zahlen von kosmischer Größenordnung zu tun und der im Umgang mit solchen Zahlenwerten Ungewohnte muß sich diesen Größenordnungen in seinem Denken erst anpassen, vorstellbar sind sie nicht.

Um einen Überblick über die Energiequellen der Erde zu erhalten, müssen wir zunächst etwas über den Aufbau der Erde wissen. Wie können wir, die

wir an die Oberfläche der Erde gebannt und denen durch unmittelbare Beobachtung nur wenige Kilometer der Erdtiefe unmittelbar zugänglich sind, etwas über den Aufbau und die Zusammensetzung des Erdinnern aussagen? Das mächtigste Hilfsmittel dazu sind die elastischen Wellen, welche durch starke Erdbeben ausgelöst, den gesamten Erdball durchqueren, dabei entsprechend seinem Aufbau die mannigfachsten Veränderungen erfahren und schließlich von den über die ganze Erde verteilten Erdbebenwarten aufgezeichnet werden. Dieses durch Jahrzehnte gesammelte Material und seine Analyse hat uns ein weitgehendes und gut fundiertes Wissen über den Aufbau und die physikalischen Zustände im Innern unseres Planeten vermittelt. Die Erdbebenwellen sind für den Geophysiker dasselbe, wie die Lichtstrahlen, die aus den Tiefen des Universums kommend, dem Astrophysiker das Wissen um Größe, Zusammensetzung, Energiehaushalt und Alter ferner Sonnen und Weltsysteme vermitteln. Zur Analyse verwenden beide die gleichen physikalischen Gesetze, die den gesamten Kosmos beherrschen.

Die Erde stellt sich nach dem Ergebnis dieser durch mehr als fünf Jahrzehnte fortgesetzten Analyse als ein mehrschichtiger Körper dar. Außen umgibt sie die sehr dünne, im Mittel nur 33 km dicke Kruste mit ihrem unregelmäßigen Massenaufbau; in ihr sind die leichtesten

Bestandteile des Erdkörpers enthalten, vorwiegend Oxyde und Hydroxyde des Aluminiums, Magnesiums und Calciums. Unter ihr erstreckt sich bis zu einer Tiefe von 2900 km der Mantel, der aus Massen zunehmender Dichte aufgebaut ist. Unter ihm liegt der Erdkern, der wieder aus zwei Teilen, dem bis zu einer Tiefe von 5100 reichenden Außenkern und dem von da bis zum Erdzentrum in einer Tiefe von 6370 km reichenden Innenkern besteht. Es genügt für unsere Zwecke vollständig, die Erde als eine Kugel mit einem Radius von 6370 km anzunehmen.

Die seismischen Beobachtungen gestatten uns auch, den Verlauf der Dichte und damit auch des Druckes und der Schwerkraft im Erdkörper auszurechnen. Diese Größen zusammen mit der Temperaturverteilung in der Erde bestimmen das Verhalten der Materie innerhalb des Erdkörpers, der Physiker bezeichnet sie deswegen auch als Zustandsgrößen.

Bevor wir jedoch in unseren Betrachtungen fortfahren, muß noch auf zwei sehr wichtige Umstände hingewiesen werden: einmal haben wir es bei allen Vorgängen, die sich auf und in der Erde abspielen, mit ganz gewaltigen Umsetzungen zu tun, auch wenn für uns an der Erdoberfläche davon kaum etwas merkbar wird, so daß wir es stets mit sehr großen Zahlenwerten zu tun bekommen, wenn wir sie beschreiben wollen. Zum andern aber

stehen wir an der Erdoberfläche fast stets außerhalb dieses gewaltigen Geschehens, wir sind durch das Vorhandensein der Kruste gegen die unmittelbare Teilnahme an diesen freilich auch meist sehr langsam verlaufenden Prozessen geschützt. Wir dürfen aber nicht unsere gewöhnlichen Vorstellungen über den Zustand der uns an der Oberfläche entgegentretenden Materie auch auf die den Erdkörper in seiner Tiefe aufbauenden Materie übertragen. Wir selbst leben im Bereich eines Ausnahmezustandes und nur dadurch ist organisches Leben und damit auch unser Leben möglich.

Wie lebendig die Erde ist, zeigt uns der Stoffbestand an ihrer Oberfläche. Nur 10% der an der Oberfläche befindlichen Gesteine sind Sedimente, d. h. sie entstammen der Zerstörungs- und Aufbauarbeit der von außen auf die Erde einwirkenden Kräfte, 90% aller Gesteine sind aber Ergußgesteine, wie sie plötzlich, d. h. unmittelbar und leicht beobachtbar, durch Vulkane an die Erdoberfläche gebracht werden. Wäre aber dieser Stoffaustausch mit der Tiefe nicht ständig und dauernd tätig, gäbe es diesen Kreislauf der Materie nicht, dann wäre bei dem hohen Alter der Erde, diese schon längst ausschließlich von Sedimenten bedeckt, sie wäre schon längst eingeebnet, es gäbe keine Gebirge, da die von außen wirkenden Kräfte der Abtragung und Verwitterung eben durch Milliarden Jahre tätig sind.

Das vielfach gegliederte Oberflächenrelief der Erde ist ebenso, wie der Stoffbestand der Oberflächengesteine ein Beweis für die Wirksamkeit endogener, aus dem Innern der Erde und ihren eigenen Energiequellen wirkender Kräfte, deren Walten durch den dünnen, aber sehr widerstandsfähigen Panzer der Kruste in einer für den Bestand des organischen Lebens erträglichen Weise abgeschwächt, dabei aber auch in den steinernen Monumenten des Oberflächenreliefs festgehalten und sichtbar gemacht wird.

Im Gegensatz zu der in der Tiefe der Erde befindlichen Materie sind die Gesteine der Erdoberfläche, der Kruste, totes Material. Sie haben beim Empordringen ihren ursprünglichen, gewaltigen Energievorrat verbraucht. Die Materie der Tiefe ist aber energiegeladener Stoff; wie gewaltig diese Energien ursprünglich sind, zeigen uns in schon stark abgeschwächter Form die Vorgänge bei Vulkanausbrüchen, bei denen der energiegeladene Stoff der Tiefe, das Magma, verhältnismäßig rasch bis zur Oberfläche empordringt. Wäre es möglich, Materie aus großer Tiefe, etwa aus einigen hundert Kilometern Abstand von der Oberfläche in unverändertem Zustand plötzlich bis zur Erdoberfläche zu schaffen und dann dort sich selbst zu überlassen, so würde dieser Stoff dort Wirkungen entfalten, die denen unserer stärksten Sprengstoffe weit überlegen wären. Der Stoff der Tiefe

ist im Gegensatz zu den Gesteinen der Erdoberfläche lebendiger, energiegeladener Stoff.

Ein kurzer Überblick über die Verteilung der Zustandsgrößen im Erdinnern zeigt dies nun auch in zahlenmäßiger Form. An der Grenze des Außenkerns beträgt der Druck fast 1.4 Millionen Atmosphären an der Grenze des Innenkerns schon 3.2 Millionen und im Erdzentrum 3.64 Millionen Atmosphären. Die gewaltige Zunahme des Druckes innerhalb des Erdkörpers bewirkt entsprechende Änderungen in der Struktur der Materie. Die Elementarbausteine der Materie, die Atome, müssen immer enger zusammenrücken, sie müssen solche Konfigurationen annehmen, bei denen ihre innere Spannkraft dem äußeren Druck das Gleichgewicht hält. Gleiche chemische Verbindungen haben im Innern der Erde eine andere Struktur als an ihrer Oberfläche bei Druckentlastung. Die Grenze des Außenkerns bezeichnet nicht eine jähe Änderung der stofflichen Zusammensetzung, sondern nur eine durch den gewaltigen Druck erzwungene plötzliche und entscheidende Änderung der Struktur. Die äußeren Elektronenhüllen der Atome gehen hier weitgehend verloren, dadurch können nun die Atomkerne enger zusammenrücken, um dem Druck zu widerstehen. Die freigebliebenen Elektronen bilden aber Schichten hoher elektrischer Leitfähigkeit, die Materie geht hier vom kristallinen zum metallischen Zustand über.

Nur dadurch wird der plötzliche starke Dichtesprung von 5.7 g/cm^3 auf 9.4 g/cm^3 verständlich, der sich nach den Messungsergebnissen der Seismik in einer Schicht, die höchstens 2 km dick sein darf, vollzieht. Eine Veränderung der stofflichen Beschaffenheit — etwa ein Übergang von eisenhaltigen Verbindungen zu reinem Eisen, wie man ihn früher angenommen hat — könnte eine derartig scharfe Grenzfläche der physikalischen Beschaffenheit niemals ergeben, sie könnte nur zu einer mehr oder minder ausgedehnten Übergangsschicht führen. Dies sehen wir an der Grenze des Innenkerns, wo in einer etwa 150 km dicken Übergangsschicht ein neuerlicher Dichtesprung von 11.5 g/cm^3 im Außenkern zu 16.8 g/cm^3 im Innenkern stattfindet. Hier handelt es sich um eine echte Materialänderung. Erst der Innenkern ist aus Nickel-eisen im Sinne der früheren Annahmen über die Konstitution des Erdinnern zusammengesetzt. In ihm nimmt gegen das Erdzentrum dann die Dichte auch kaum mehr zu, entsprechend seinem stofflich homogenen Aufbau. In den über dem Erdkern liegenden Schichten ist hingegen die Dichtezunahme überwiegend bedingt durch Packungseffekte, durch die andauernde Kompression der Elementarbestandteile der chemischen Verbindungen. Im Außenkern bewirkt die Abtrennung der als Verzahnung zwischen den einzelnen Atomen dienenden Elektronenhüllen noch, daß sich hier die Materie

wie ein fluides, also flüssigkeitsähnliches Medium, benimmt. Ihre Formfestigkeit, die eben auf der Verzahnung der einzelnen Grundbausteine beruht, ist durch die Schwächung und den Abbau der Elektronenhüllen weitgehendst herabgesetzt. Im Innern entspricht hingegen der Zustand der Materie wieder der eines festen Körpers.

Eine der wichtigsten Zustandsgrößen ist die Temperatur, weil durch sie weitgehend der Energieinhalt eines Körpers bestimmt wird. Wir wissen heute mit ziemlicher Sicherheit, daß die Temperatur im Erdzentrum zwischen 3000 und 4000° C liegt; im Innern herrscht dabei gleiche Temperatur, sie nimmt bis zur Grenze des Außenkerns nur wenig ab. Die Hauptabnahme der Temperatur erfolgt erst in den äußersten Teilen des Mantels und in der Kruste selbst. Noch in 100 km Tiefe beträgt die Temperatur ungefähr 1500° C. Dies hat seinen Grund darin, daß die Hauptheizquellen der Erde, die radioaktiven Elemente, zum überwiegenden Teil in der Kruste enthalten sind und von dort aus die von ihnen erzeugte Wärme einmal nach außen zur Erdoberfläche abgeben, zum andern aber die Abkühlung des Erdinnern hemmen. Es entsteht so in den äußersten Schichten der Erde ein Wärmestau. Die geheizte Außenhülle der Erde wirkt ungefähr so, wie die wärmeundurchlässige Wandung einer Thermosflasche

Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die Heiz-

quellen der Erde einmal versiegen werden. Wegen der großen Halbwertszeiten der dafür maßgebenden radioaktiven Elemente liegt aber dieser Zeitpunkt in einer sehr fernen Zukunft, wenn auch heute die von ihnen herrührende Wärmeproduktion nur mehr ungefähr die Hälfte des Betrages ausmacht, wie im Kindheitsstadium der Erdentwicklung.

Gerade die Wärmeproduktion der Erde und ihr Abkühlungsvorgang liefern uns aber nun die ersten zuverlässigen Unterlagen, um die energetische Entwicklung der Erde zu verfolgen. Schon im vorigen Jahrhundert wurde der Versuch gemacht, das Alter der Erde aus ihrer Abkühlung zu bestimmen, doch mußte ein solcher Versuch damals naturgemäß daran scheitern, daß seine Grundlagen und Grundannahmen allzu sehr hypothetischen Charakter hatten. Heute sind dagegen solche Versuche sehr aussichtsreich, vor allem, weil das Alter der Erde als bekannt vorausgesetzt werden kann.

Über die Geburt der Erde können nur Hypothesen gemacht werden; zwei Annahmen stehen heute dabei als physikalisch möglich im Vordergrund: die Entstehung der Erde aus oder gleichzeitig mit der Sonne, also Geburt aus einer „Ursonne“, oder die parallele Entstehung von Sonne und Planeten aus einer kosmischen Wolke durch Zusammenballung. Beide Hypothesen haben heute noch gewisse Widersprüche aufzuweisen, doch scheint mir

die erste, die der Sonne gewissermaßen eine primäre, mütterliche Rolle bei der Entstehung des Planetensystems zuweist, einen höheren Grad an Wahrscheinlichkeit zu besitzen als die zweite, bei der allen Gliedern des Planetensystems der gleiche Rang, sozusagen eine geschwisterliche Stellung eingeräumt wird. Für die thermische Entwicklungsgeschichte der Erde sind indessen bei beiden Annahmen die Unterschiede von untergeordneter Bedeutung und kommen in großen Zügen auf das selbe hinaus.

Bei der Geburt aus der Sonne war die Erde zunächst ein sonnenähnlicher Planet, doch konnte dieses Stadium ihrer Entwicklung nur eine äußerst kurze Zeitspanne umfassen. Denn wegen ihrer geringen Masse und der sehr geringen Schwerkraft an ihrer damals weit ausgedehnteren Oberfläche konnte die junge Erde den Wasserstoff, der für den Fortbestand einer sonnenähnlichen Existenz als Energieträger unbedingt erforderlich ist, nicht festhalten. Damit war aber auch das energieaktive Stadium der Erdentwicklung beendet. Der darauf folgende gewaltige Energieverlust durch Ausstrahlung konnte nurmehr aus dem eigenen Vorrat an Wärmeenergie gedeckt werden und führte sogleich zu rascher Abkühlung und Kontraktion. Trotz der zusätzlichen Wärmeproduktion durch die Kontraktion konnte jedoch auch dieses reine Strahlungsstadium nur kurze Zeit währen, da da-

mit eine rasche Abkühlung verbunden war, die den ursprünglichen Gasball in das flüssige Stadium überführte, in dem nun der Wärmetransport aus dem Innern an die Oberfläche nurmehr durch Konvektion, d. h. materiellen Transport wärmerer Massen aus dem Innern an die Oberfläche und Absinken abgekühlter Massen in die Tiefe möglich war. Diese Art der Wärmeabgabe ist viel weniger leistungsfähig als der Wärmeverlust durch Strahlung, dementsprechend verlangsamte sich in diesem Stadium schon die thermische Entwicklung der Erde und diese wurde noch weiter verlangsamt als die Temperatur der Erde soweit gesunken war, daß nunmehr die Verfestigung des Erdkörpers begann. Bei der verhältnismäßigen Kleinheit der Erdmasse waren die vorhergehenden Stadien, in denen die Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion die Wärmeproduktion der Erde aus eigenen Energiequellen, wie sie der radioaktive Zerfall und die Kontraktion hauptsächlich waren, weitgehend überstiegen, so kurz, daß sie zeitlich bei der thermischen Entwicklungsgeschichte der Erde ganz vernachlässigt werden dürfen. Die thermische Entwicklungsgeschichte beginnt erst zu dem Zeitpunkt, als die Wärmeleitung allein für die Abfuhr und die Verteilung der Wärme innerhalb des Erdkörpers fast ausschließlich maßgebend war. Die vorhergehenden Stadien konnten höchstens einige Millionen Jahre umfassen, ein im

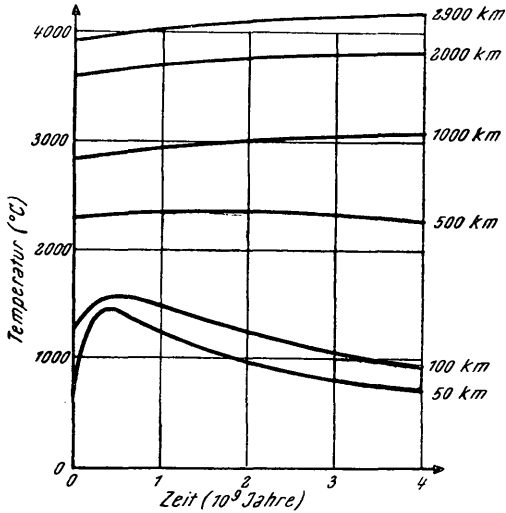
Verhältnis zum Gesamtalter der Erde verschwindender Zeitraum.

Die Wärmeleitung ist nun im Verhältnis zum Wärmetransport durch Konvektion oder gar durch Strahlung ein sehr unergiebig und langsam verlaufender Prozeß. Durch Wärmeleitung können nur geringe Energiemengen aus dem Innern der Erde an ihre Oberfläche befördert werden, die Wärmeverteilung im Innern wird daher durch Wärmeleitung nur sehr langsam verändert werden.

Die zeitlichen Veränderungen der Temperaturverteilung im Erdinnern unter dem Einfluß der Wärmeleitung lassen sich berechnen, wenn auch die praktische Durchführung dieser Rechnung in Zahlenwerten erst durch Einsatz von elektronischen Rechenmaschinen möglich war. Man kann nun derartige thermische Erdmodelle unter den verschiedensten Annahmen berechnen. Diese Annahmen beziehen sich einmal auf die ursprüngliche Temperaturverteilung im Erdinnern zu dem Zeitpunkt, als die Wärmeleitung allein für die weitere Energieabgabe der Erde maßgebend wurde, andererseits aber auf die Ergiebigkeit und die Verteilung der Wärmequellen in der Erde, die zusätzlich Wärme erzeugen.

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis einer derartigen Modellrechnung graphisch dargestellt. Sie zeigt den Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen der Erde bis zur Kerngrenze

(2900 km). Die Grundannahmen für den hier dargestellten Modellfall waren, daß zu Beginn der Entwicklung die Temperaturverteilung in der Erde der jeweiligen Schmelzpunkttemperatur entsprach



Thermische Entwicklungsgeschichte eines Erdmodells mit radioaktiver Wärmeentwicklung in der Kruste.

und daß die radioaktiven Heizquellen ihren Sitz vorwiegend im Bereich der Kruste haben und dabei eine solche Ergiebigkeit, daß sie den heute gemessenen Wärmeverlust der Erde gerade noch decken. Zu Beginn der hier dargestellten Entwicklung war dann ihre Ergiebigkeit ungefähr doppelt so groß wie jetzt. Als Zeiteinheit der Darstellung

wurde eine Milliarde Jahre gewählt. Das gewählte Modell — es ist nur eines aus einer Reihe von tatsächlich berechneten — entspricht am besten den tatsächlichen Verhältnissen der wirklichen Erdentwicklung, ohne sie jedoch wegen der aus mathematischen Gründen vorgenommenen Vereinfachungen bis ins letzte Detail darstellen zu können. Hinsichtlich des zeitlichen Ablaufes stimmt es jedoch mit der Wirklichkeit gut überein, wenn auch die erhaltenen Temperaturen teilweise etwas zu hoch sind.

Das erste, was an der Darstellung auffällig ist, ist die auffallende Langsamkeit aller Änderungen. Größere Änderungen der Temperatur erfolgen überhaupt nur in den äußersten 100 km des Erdkörpers, also im Bereich der eigentlichen Heizzone. Im Innern unterhalb der 500 km Schicht steigt die Temperatur im Lauf der Zeit langsam an. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit abnehmendem Radius, (also zunehmender Tiefe) die darunter liegende Masse sehr rasch abnimmt, dort also gleiche zugeführte Wärmemengen einen stärkeren Temperaturanstieg bedingen als in den äußeren Schichten, in denen nach anfänglicher Aufheizung bereits eine Temperaturabnahme stattfindet, die allerdings gegen die Gegenwart zu, immer langsamer wird.

Wie rasch die Massenabnahme mit abnehmendem Radius trotz der stark zunehmenden Dichte erfolgt,

mögen die folgenden Angaben zeigen. Bei einem Radius von immerhin noch 3470 km enthält der Außenkern nurmehr 30%, der Innenkern aber mit einem Radius von 1250 km nurmehr 2.3% der gesamten Erdmasse. Deshalb ist in der Abbildung der zeitliche Temperaturablauf auch nur bis zur Grenze des Außenkerns eingetragen, da sich in größeren Tiefen die Erde praktisch isotherm verhält, d. h. die gleichen Temperaturänderungen zeigt, wie sie an der Grenze des Außenkerns auftreten.

Die zukünftige Entwicklung der Temperaturverteilung in der Erde läßt sich nun leicht aus der bisher erfolgten ableiten. Mit abnehmender Heizwirkung der eigenen Wärmequellen werden die Kurvenverläufe immer flacher werden, d. h. in einer immerhin noch fernen Zukunft werden sich die Temperaturen in allen Tiefen der Erde kaum noch mit der Zeit ändern und erst dann kommt eine Zeit dauernder Temperaturabnahme in allen Bereichen. Doch ist diese Zeit noch sehr ferne. Die Rechnung lehrt, daß selbst nach Ablauf einer Zeit von 40 Billionen Jahren, d. i. der hundertfache Zeitraum der bisher verflissenen erdgeschichtlichen Zeit, die Mittelpunktstemperatur der Erde von der heutigen kaum verschieden sein wird. Allerdings wird in den äußersten Schichten die Abkühlung sich wesentlich stärker als heute fühlbar gemacht haben. Doch sind Extrapolationen auf

so lange Zeit deswegen eigentlich sinnlos, weil es sich hier um Zeiträume handelt, die diejenigen der uns heute bekannten kosmischen Entwicklung weit übertreffen.

In thermischer Beziehung befindet sich die Erde also noch in einem jugendlichen Stadium ihres Planetendaseins. Eine merkliche Änderung der heutigen Zustandsverteilung im Erdinnern ist für eine weitere Milliarde Jahre kaum anzunehmen.

Aus dem inneren Wärmevorrat der Erde werden aber noch andere Vorgänge gespeist. Zunächst beträgt der Wärmeverlust der Erde im Jahr nach den heute vorliegenden Messungen, die sich nunmehr auch auf die Meeresböden erstrecken, im Jahr rund $2 \cdot 10^{20}$ Kalorien (200 Trillionen Kalorien). Diese gewaltige Wärmemenge spielt übrigens im Wärmehaushalt der Erdoberfläche, unseres Lebensraumes kaum eine Rolle. Dieser wird vielmehr ausschließlich durch die Wärmezufuhr von seiten der Sonne bestritten. Ferner wird bei Vulkanausbrüchen und durch die seismische Tätigkeit ebenfalls Wärmeenergie, wenn auch teilweise in umgewandelter Form verbraucht. Dieser Verlust beträgt im Durchschnitt etwa $2.5 \cdot 10^{19}$ Kalorien im Jahr und schließlich verbraucht die Aufrechterhaltung des erdmagnetischen Feldes der Erde noch rund $1.5 \cdot 10^{16}$ Kalorien pro Jahr. Das Magnetfeld der Erde wird durch Strömungsvorgänge in den äußeren Teilen

des fluiden Außenkerns erzeugt, die ähnlich wie eine Dynamomaschine geordnete elektrische Stromsysteme erzeugen. Ihre Bewegungsenergie wird aus thermischen Quellen gespeist.

Dem Magnetfeld der Erde kommt eine bedeutende Rolle für den Schutz des organischen Lebens auf der Erde zu. Denn es schützt die unteren Bereiche der Erdatmosphäre vor dem direkten Eindringen korpuskularer Strahlung, also auch der kosmischen Strahlung. Es ist die Ursache für die Ausbildung der drei großen Strahlungsgürtel rings um die Erde, in denen sich die von ihm aufgefangenen Korpuskel zu geordneten Systemen zusammenfügen.

Schwieriger ist der Energieverbrauch zu erfassen, der für die Aufrechterhaltung der tektonischen Prozesse erforderlich ist. Denn bei diesen wird teilweise auch wieder Arbeit im Schwerefeld der Erde gewonnen, da langsam, aber unaufhaltsam die weitere Differenzierung und Anordnung der die Erde aufbauenden Massen nach ihrer Dichte erfolgt. Gegenwärtig dürfte er wohl von der gleichen Größenordnung sein, wie der Wärmeverlust der Erde durch Leitung nach außen.

Faßt man nun alle diese Energieentnahmen zusammen, so erhält man einen Betrag von etwa $4 \cdot 10^{20}$ Kalorien. Dieser Betrag aber wird annähernd zur Gänze heute noch durch die Produktion der radioaktiven Wärmequellen gedeckt. Der

reine Wärmehalt der Erde beträgt übrigens ungefähr $3 \cdot 10^{30}$ Kalorien. Würde der jetzige Energieverbrauch allein auf seine Kosten gehen — was nicht der Fall ist — so würde er sich auf Grund des angegebenen Verbrauchs in einer Milliarde Jahre nur um etwa ein Zehntel vermindern.

Wir müssen aber noch andere Faktoren, die für den Bestand des heutigen organischen Lebens von Bedeutung sind, betrachten. Die Oberflächentemperatur der Erde wird ausschließlich durch die Zufuhr von Sonnenenergie bestimmt. Die Wärmespende der Erde ist unbedeutend, da durch den Vorgang der Wärmeleitung aus dem gewaltigen Vorrat an thermischer Energie nur ein sehr kleiner Betrag an die Oberfläche befördert werden kann. Die Energieleistung der Sonne muß aber sehr konstant bleiben, wenn sich die Mitteltemperatur an der Erdoberfläche nicht ändern soll. Eine Verringerung der Mitteltemperatur der Sonnenoberfläche von 20° bewirkt eine Verringerung der mittleren Oberflächentemperatur der Erde um 1° , was sich klimatisch schon sehr bemerkbar machen würde.

Aber auch die Sonne ist entwicklungsmäßig gesehen, ein junger Stern, die Konstanz ihrer Energieerzeugung ist für einen Zeitraum von einigen Milliarden Jahren sicher. Von dieser Seite ist daher kein lebensbedrohender Einfluß zu befürchten.

Auch eine Änderung der Rotationsdauer der

Erde, d. h. eine Änderung der Tageslänge könnte von Bedeutung sein. Tatsächlich wirkt auf die Erde die bremsende Kraft der Gezeitenreibung, zum größten Teil durch den Mond verursacht, ein. Die Energie der Drehbewegung ist sehr beträchtlich, sie beträgt etwa $5 \cdot 10^{25}$ Kalorien, die hemmende Wirkung der Gezeitenbremse entspricht hingegen $7 \cdot 10^{15}$ Kalorien. Damit die Tageslänge sich verdopple, müßte die Rotationsenergie auf den vierten Teil verringert werden. Dazu müßte die Gezeitenbremse bei stets gleicher Wirksamkeit — was nicht zutreffend ist — fast 5 Milliarden Jahre wirken. Also auch von dieser Seite kann der jetzige Zustand der Erde innerhalb einer sehr großen Zeitspanne nicht merklich verändert werden.

Die Erde ist auch einer dauernden Massenzufuhr ausgesetzt. Im Mittel kann die tägliche Menge von Meteorstaub, der durch die Erde eingefangen wird, auf etwa 3000 Tonnen veranschlagt werden. Das gibt im Jahr etwa eine Million Tonnen Massenzuwachs. Bezogen auf die Masse der Erde von 6000 Trillionen Tonnen ist dieser Massenzuwachs jedoch auch innerhalb im geologischen Sinne langer Zeiträume nur unbedeutend. Er würde — soweit eine derartige Rechnung überhaupt sinnvoll ist — in einer Milliarde Jahre erst etwas mehr als ein Zehnmillionstel der Erdmasse ausmachen. Innerhalb der geologisch überblickbaren Zeit könnte also ein derartiger Massenzuwachs

keine merkliche Änderung der Erdrotation oder der Erdbahn um die Sonne bewirken.

Die Lebensdauer des Sonnensystems ist mindestens ebenso groß wie die Lebensdauer der Erde selbst. Gerade aber durch die lange Zeitdauer seines Bestandes scheint seine Stabilität gesichert. Jede ursprünglich vorhandene Instabilität hat sich in der Zwischenzeit schon ausgeglichen, oder sie hätte schon längst zum Zusammenbruch des Systems geführt. Dies bestätigen übrigens auch die Rechnungen der Astronomen.

Zusammenfassend kann also behauptet werden, daß die Entwicklung der Erde derzeit zu einem in jeder Beziehung fast stationären Zustand geführt hat; selbst für einen Zeitraum, der dem der genauer überblickbaren geologischen Geschichte der Erde — also etwa einer Milliarde Jahre entspricht — ist keine nennenswerte Änderung des derzeitigen physikalischen Zustandes und damit der heute auf der Erdoberfläche herrschenden Lebensbedingungen zu erwarten oder zu befürchten.

Unmittelbare Gefahren für den Bestand des Lebens bestehen heute eigentlich nur von seiten des Menschen selbst. Nur er könnte durch Mißbrauch seiner heute noch recht unvollkommenen Einsicht in das Wesen atomarer Vorgänge, vor allem bei Auslösung eines Krieges mit Anwendung atomarer Kampfmittel die Erde so verseuchen, daß sie für den Menschen und vielleicht auch für die

meisten oder alle anderen Formen des Lebens auf der Erde unbewohnbar wird.

Aber noch ein anderer Gedanke drängt sich hier auf. Die Geschichte der Lebensformen auf der Erde zeigt, daß den einzelnen Gattungen und Arten nur eine beschränkte Lebensdauer zukommt. Ebenso, wie es Zeiten der Erdgeschichte gegeben hat, in denen der Mensch noch nicht vorhanden war, wird es auch Zeiten geben, in denen er nicht mehr sein wird, ohne daß sich dabei an den Umweltverhältnissen wesentliches geändert haben müßte. Wird nicht die Konstanz des gegenwärtigen physikalischen Zustandes die Lebensdauer des Menschengeschlechtes übertreffen?