



Die Entstehung und Zusammensetzung der Erde

Von Kurt Bangert

Wenn wir von der Mitte der Welt sprechen, so darf ein Kapitel über die geologische beziehungsweise geometrische Mitte unserer Erde nicht fehlen. Da wir wissen, dass die Erde keine Scheibe, sondern eine Kugel ist, dürfen wir ihre Mitte nicht an der Oberfläche suchen, sondern müssen in ihr Inneres schauen. Wir wollen der Frage nach der Mitte unserer Welt endlich auf den Grund gehen oder anders gesagt: Wir wollen zum Kern der Sache kommen.

Die Erde ist in gewisser Weise aus heiterem Himmel entstanden, will sagen: Es gab eine Zeit, da sie nicht war, und es gab eine Zeit, als sie auf einmal da war. Aber dieser Vorgang der Erdentstehung war natürlich kein Hokusfokus, auch nicht das Resultat einer *ex nihilo*-Schöpfung aus dem Nichts, sondern das Ergebnis eines ganz natürlichen Vorgangs.

Die Wissenschaft geht davon aus, dass an der Stelle, wo sich heute unser Sonnensystem befindet, es vor rund fünf Milliarden Jahren nur eine gigantische Staubwolke gab, die – hätte man sie von außen betrachten können – vermutlich viel Sternenlicht dahinter verschluckt hätte. Woher kam die Staubwolke? Vermutlich war sie das Ergebnis einer oder mehrerer riesiger Sternexplosionen in grauer Vorzeit, denn die Wolke enthielt Elemente und Schwermetalle, die nach heutigen Erkenntnissen nur im Innern großer Sterne entstehen konnten.

Staubwolken pflegen sich im gar nicht so leeren Weltraum durch die Gravitationskraft zusammenzuziehen – sofern sie sich nicht aufgrund einer Sternexplosion oder dank anderer Fliehkräfte gerade im Prozess des Auseinanderstrebens befinden. Werden die Staubkörner durch Explosionen oder Fliehkräfte in Bewegung gesetzt, so hält sie im schwerelosen All kaum etwas auf, diese Bewegung des Auseinanderstrebens unendlich fortzusetzen – außer die Schwerkraft hindert sie daran. Diese Schwerkraft war es offenbar, die auch unsere heimatliche Staubwolke immer mehr zusammenziehen ließ, bis sie sich unter dem gleichzeitigen Einfluss von Gravitations- und Zentrifugalkräften zu einem schnell drehenden „protoplanetarischen“ Scheibennebel verdichtete.



Die protoplanetarische Akkretionsscheibe (verdichtete und abgeflachte Staubwolke) des gerade erst neu gebildeten Sterns Orion 114 im Orientnebel. (Quelle: McCaughrean, O'Dell, ESO)

Bei dieser Verdichtung kam es innerhalb der so genannten „Akkretionsscheibe“ zu unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten, da sie sich im Zentrum schneller als in ihren äußeren Bereichen bewegte, was wiederum dazu führte, dass sich um den Kern der Scheibe immer mehr Masse ansammelte („akkretierte“), bis sich ein großes zentrales Objekt herausbildete, während sich auf dem Rest der sich leicht elliptisch drehenden Scheibe hier und da weitere kleinere Zusammenballungen bildeten. Es bildeten sich die Sonne und unsere acht Planeten, darunter die Erde. Es sind übrigens nicht mehr die lange gewohnten neun Planeten, denn Pluto wird seit dem Sommer 2006 nicht mehr unter die Planeten gerechnet, da er aufgrund seiner Größe – oder besser: Kleinheit – nur noch zu der neu geschaffenen Kategorie der Zwergplaneten gerechnet wird.

Zunächst war die Erde, so haben die Wissenschaftler Anlass zu vermuten, noch nicht kugelförmig (was sie übrigens heute immer noch nicht ist), und sie besaß auch noch keine feste Oberfläche in Form von Kontinenten. Die unterschiedlichen Staubkörner sammelten sich nahezu beliebig und ungeachtet ihrer chemischen Zusammensetzung innerhalb dieses neu entstehenden Planeten. Durch aufprallende Meteoriten vergrößerte sich die Erde immer mehr und wärmte sich immer mehr auf, so dass alle Elemente und alles Gestein aufgeschmolzen wurden. Mit der Abnahme des Meteoritenbeschusses jedoch kühlte die Erde ab, so dass sich nach und nach die Erdkruste herausbilden konnte.

Bei einer weiteren Abkühlung unter 100 Grad Celsius konnte sich dann aus dem die Erde umgebenden Wasserdampf und Kohlendioxid – vermutlich durch einen lang anhaltenden Regen – auch das Meer bilden. Allerdings bleibt es immer noch ein ungelöstes Rätsel, warum es gerade auf der Erde so viel Wasser gibt und woher es gekommen sein könnte.

Durch die Aufschmelzung der frühen Erde musste es aufgrund der gravitativen Kräfte zu einer Aufteilung des Erdkörpers in einen Erdkern und einen Erdmantel kommen, wobei die schweren Elemente wie Eisen und Nickel eher in Richtung Erdmittelpunkt absanken und die leichteren Elemente, wie der Sauerstoff, das Leichtmetall Aluminium oder das Halbmetall Silizium, sich zur Erdoberfläche hin orientierten. Aus den leichteren Metallen nahe der Oberfläche bildete sich dann die vergleichsweise dünne Erdkruste. Die Erdkruste und der Mantel sind fest, weil die Temperaturen, die am tiefsten Punkt des Mantels immerhin bereits 2700 Grad Celsius betragen, nicht ausreichen, um das Gestein zum



Schmelzen zu bringen. Die Temperaturen im Kernbereich der Erde sind jedoch noch höher, weshalb sogar Eisen und Nickel flüssig sind.

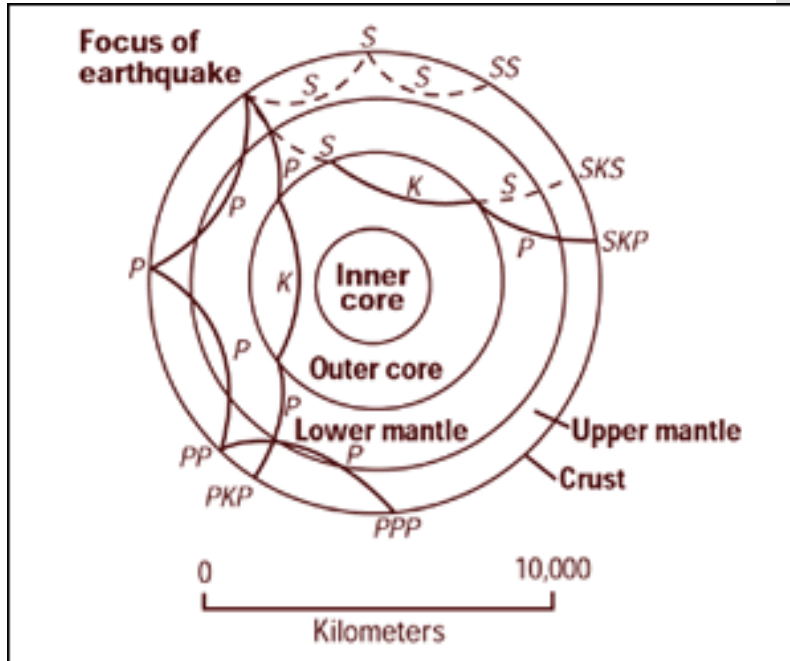
Bewegten wir uns mittels einer großen Bohrmaschine von der Erdoberfläche ins Erdinnere, was wohl würden wir entdecken? Und wie tief kämen wir? Wäre es denkbar, bis zum Erdmittelpunkt vorzudringen? Und was würde uns dort erwarten?

Gewiss auch inspiriert von dem großen französischen Schriftsteller Jules Verne und seinen Buchklassikern „Von der Erde zum Mond“ und „Die Reise zum Mittelpunkt der Erde“ haben amerikanische und russische Wissenschaftler in den vergangenen Jahrzehnten nicht nur darum gewetteifert, wer den ersten Menschen zum Mond schicken würde, sondern auch darum, wer das tiefste Loch in die Erde bohren würde. Dass die Amerikaner den Wettlauf zum Mond gewannen, ist allseits bekannt, weniger geläufig ist die Tatsache, dass die Russen das tiefste Erdloch gebohrt haben. Eine amerikanische Gasfirma drang 1974 bis ca. 9.500 m ins Erdinnere, aber die Russen halten den Weltrekord. Auf der nahe Finnland gelegenen Halbinsel Kola erreichten sie 1994 nach jahrzehntelangen Bohrungen eine Rekordtiefe von über 12.000 Metern. Deutsche Wissenschaftler schafften es im selben Jahr, nach nur vier Jahren Bohrzeit, auf eine Tiefe von immerhin 9.100 Metern zu kommen.

Tiefere Bohrungen als 10 bis 12 km sind kaum möglich, weil die Temperaturen in solchen Tiefen um die 300 Grad betragen, zuviel für die Bohrmaschinen, die bei höheren Temperaturen zu schmelzen beginnen. Bei 12 km Tiefe ist man aber gerade einmal zur Hälfte durch die dünne Erdkruste gelangt und noch immer rund 6300 km vom Erdmittelpunkt entfernt. Es ist also nicht möglich „nachzuschauen“, welche Verhältnisse im Zentrum unserer Erde herrschen. Dennoch wissen Wissenschaftler sehr viel über das Innere unseres Heimatplaneten.

Schon Isaak Newton errechnete, dass die Durchschnittsdichte der Erde doppelt so groß ist wie die Dichte des Gesteins, das wir an der Erdoberfläche finden. Obwohl die Wissenschaft bis heute sehr viel mehr Detailwissen angehäuft hat als zu Zeiten Newtons, gilt dessen Dichteberechnung auch heute noch. Die Dichte des Erdgesteins nimmt also in Richtung des Erdzentrums zu, und zwar von 3.000 Kilogramm pro Kubikmeter an der Oberfläche über 5.000 Kilogramm pro Kubikmeter am unteren Mantel bis über 10.000 kg im Erdkern. Dieser Dichte ist es zu verdanken, dass der Kern, obwohl er nur 16,2 Prozent des Erdvolumens ausmacht, immerhin 31,5 Prozent der Erdmasse enthält. Damit ist die Erde der dichteste aller Planeten unseres Sonnensystems.

Obwohl wir, wie gesagt, physisch nicht sehr tief ins Erdinnere vordringen können, wissen wir doch sehr viel über die chemische und physikalische Zusammensetzung der Erde. Unsere heutigen wissenschaftlichen Erkenntnisse basieren auf dem Studium des Gesteins an der Oberfläche in Verbindung mit den Hitzeströmungen aus der Erde, auf unserer Kenntnis der Vorgänge im Innern der Atome sowie auf Laborexperimenten mit Gesteinen, die hohem Druck und hohen Temperaturen ausgesetzt wurden. Vor allem basieren sie aber auf der Untersuchung des Verlaufs von seismologischen Wellen nach Erdbeben durch das Erdinnere. Man spricht von seismischen Diskontinuitäten, die sich durch Veränderungen der Erddichte sehr plausibel erklären lassen.



Dieses Schnittbild der Erde zeigt, wie sich die seismographischen Wellen von Erdbeben durch die verschiedenen Erdschichten bewegen und dadurch Aufschluss über die Zusammensetzung des Erdinnern geben. Die Kurven sind unterschiedlich, weil sich die Wellen unterschiedlich schnell durch die verschiedenen Gesteinsschichten bewegen. P-Wellen sind Kompressionswellen. S-Wellen reisen nicht durch das Innere der Erde, können aber in Kompressionswellen umgewandelt werden, um dann durch das Erdinnere zu durchlaufen (und werden dann mit dem Buchstaben K gekennzeichnet). Wellen können auch von der Erdoberfläche reflektiert werden. (Quelle: Eugene C. Robertson, unter: <http://pubs.usgs.gov/gip/interior/>)

Doch jetzt müssen wir ein Problem ansprechen, das zahlreiche Erdwissenschaftler lange Zeit nicht haben lösen können: Sie konnten sich die Hitze der Erde nicht allein mit der Freisetzung und Abstrahlung der Schwere-Energie erklären. Auch die Bewegungsenergie der auf die Erde aufprallenden Meteoriten, die, da Energie nicht verloren gehen kann, sich in Wärme umwandelte und im Zentralbereich der Erde abgespeichert wurde, schien nicht auszureichen, um die anhaltende Wärme der Erde aufrecht zu erhalten. Aber wenn Masse, Schwere und kinetische Energie (von griech. *kinesis* = Bewegung) nicht genügten, um die Temperatur der Erde zu erklären, was dann?

Die Antwort auf dieses Problem war die Entdeckung der Radioaktivität durch Henri Becquerel und deren Landsleute Marie und Pierre Curie. Mit der Radioaktivität hatten diese Franzosen nicht nur die Abstrahlung und den Zerfall von bestimmten Elementen wie etwa des labilen Uraniums aufgespürt, sondern zugleich die Kernkraft entdeckt, die größte und stärkste physikalische Kraft in unserem Universum. Die Wissenschaftler erkannten, dass es bestimmte instabile Atome gab, die laufend zerfielen und sich in andere, stabilere Elemente verwandelten. Bei diesem Vorgang, so wurde alsbald deutlich, wird Energie in Form von Wärme frei. Und diese radioaktive Wärmeabstrahlung ist es, welche die Abkühlung der Erde ausglich und unseren Heimatplaneten auch über den langen Zeitraum von mehreren Milliarden Jahren warm gehalten hat.

Die Temperaturen im Innern der Erde werden also durch Radioaktivität, Bewegungsenergie, Gravitationsenergie sowie durch den zum Erdmittelpunkt hin immer größeren Druck erzeugt. Der Druck im Innern von Gestirnen ist für unsere weiteren Kapitel von erheblicher Bedeutung, weshalb wir schon im Falle der Erde darüber reden müssen. Jede Erdschicht wird durch die über ihr lagernden Schichten zusammengepresst und drückt



seinerseits auf die unter ihr befindlichen Schichten. Man kann den Druck in Gramm pro Quadratcentimeter berechnen. An der Erdoberfläche beträgt der Druck der Atmosphäre auf die Erde (also der Luftdruck) etwa 1000 Gramm pro Quadratcentimeter. Man spricht hier auch von einem bar. Da Wasser schwerer als Luft ist, muss man im Meer mit einem erhöhten Druck rechnen, der mit zunehmender Tiefe immer mehr steigt, bis er bei 10.000 Metern Tiefe rund 1000 bar beträgt. Weil das Erdgestein schwerer als Wasser ist, ist zwangsläufig auch der Druck im Innern der Erde höher als der Wasserdruck. In einer Tiefe von 2.200 Kilometern unter der Erdoberfläche ist der Druck mit einer Million bar rund tausendmal so stark wie am Meeresgrund, und am Erdmittelpunkt beträgt er sogar unglaubliche 3,7 Millionen bar.

Bei diesem Druck muss es einen schon wundern, wie der Erdkern diesem Dauerstress überhaupt standhalten kann. Druck erzeugt Gegendruck. Wenn ein Lastwagen auf eine Holzbrücke fährt, so entsteht durch die Schwerkraft ein enormer Druck auf die Brücke, dem nur der Gegendruck der Brückenkonstruktion entgegensteht. Oder physikalisch gesprochen: Es treffen hier Holzatome und Gummiatome aufeinander, die Druck aufeinander ausüben, aber durch die gegenseitige Abstoßung für ein Gleichgewicht sorgen. Nur wenn die Brücke an irgendeiner Stelle brüchig ist, gibt sie nach, so dass der Lastwagen nach ins Tal stürzt.

So ähnlich verhält es sich im Zentrum der Erde. Obwohl unsere Atome zu 99,9 Prozent aus Nichts und nur zu weniger als 0,01 Prozent aus Materie-Teilchen wie Protonen und Elektronen bestehen, sind es doch die Kräfte im Innern der Atome, die sie daran hindern, einem Druck von außen nachzugeben und in sich zusammenzustürzen. Im Innern der Erde werden die Atome einem Druck ausgesetzt, der sie zwar zusammenquetscht – nämlich auf 85 Prozent ihrer normalen Größe – aber stabil bleiben lässt. Die Elektronen geraten durch die Hitze heftig in Bewegung und werden durch den Druck um 15 Prozent näher als normal an die Atomkerne gepresst. Die Atome sind enorm gestresst, bleiben aber in ihrer Struktur erhalten.

Würden wir uns nun trotz dieser abstrusen Verhältnisse auf eine imaginäre Reise à la Jules Verne zum Erdmittelpunkt begeben, so müssten wir uns zweifellos auf einige Unannehmlichkeiten gefasst machen. Enorme Hitze, Druck, Schwerkraft – das sind Extrembedingungen, die wir nur mit futuristischer Technologie bewältigen können. Aber gehen wir davon aus, dass unser sub-terranes Bohrmobil dem hohen Druck im Erdinnern widerstehen könnte und in der Lage wäre, Hitzegrade auszuhalten, die derjenigen der Sonnenoberfläche entsprechen. Wir würden uns dann, mit ausreichend Proviant ausgestattet, auf die Reise in die höllische Unterwelt begeben. Unsere Kühlaggregate funktionieren gut, so dass wir die zunehmende Hitze kaum spüren. Auch sonst bemerken wir kaum eine Veränderung unseres Wohlbefindens. Die Spannung steigt mit den Außentemperaturen. Wir wühlen uns durch die Erdkruste und die äußere Mantelschicht, dann durch den unteren Mantel, bis wir an den äußeren Kern gelangen. Und während wir beginnen, uns durch den Kern zu bohren, wird uns zunehmend leicht zumute, wir fühlen uns getragen und beschwingt, und dieses merkwürdige Gefühl der Unbeschwertheit nimmt mit größerer Tiefe immer mehr zu, bis wir, endlich in der Mitte der Erde angekommen, jegliche Bodenhaftung verlieren: Wir schweben. Wie Astronauten im Weltraum treiben wir in unserem Bohrmobil, das jetzt zum Stillstand gekommen ist, mal hierhin, mal dorthin. Hier im Zentrum der Erde, wo die Masse der Erde von allen Seiten gleichzeitig und gleichmäßig an uns zerrt, neutralisiert sich jede Schwerkraft, heben sich die aus allen Richtungen ziehenden Gravitationskräfte gegenseitig auf, so dass wir absolut schwerelos und gewichtslos sind.