

Die Erde

Bekannte physikalische Gesetze ermöglichen den Blick in das Erdinnere und liefern den Schlüssel zum Verständnis seiner komplizierten Dynamik.

Rolf Emmermann und Volker Haak

*Mangelt Dir aber noch immer der
Glaube, wie's möglich gewesen,
Dass aus des Wassers, der Erde, der
Luft und des Feuers Verbindung
Solcherlei Fülle entstand von bunten
Farben und Formen,
Wie von der Macht der Liebe vereint
sie wirklich vorhanden,
Lass Dir, wie all das vor sich gegang-
en, noch weiter verkünden.*
Aus: Empedokles (ca. 500 – 430 v.
Chr.) „Über die Natur“

Wasser, Erde, Luft und Feuer sind die Themen des Jahres der Geowissenschaften 2002. Diese vier Elemente erkannte der griechische Naturphilosoph Empedokles vor über 2500 Jahren als die Bausteine der Welt. Sie sind darüber hinaus Referenz an die vorsokratischen Denker, welche die Physik begründet hatten.

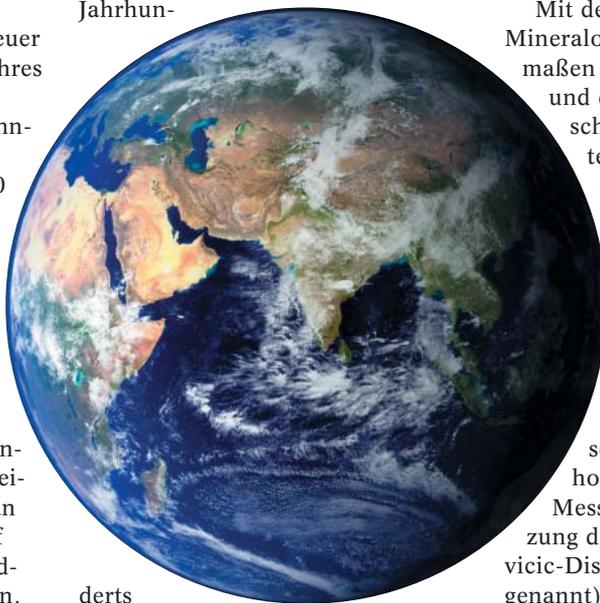
Hier soll die Erde das Thema sein, die Erde an sich. Also jener Planet, dem die Geowissenschaften ihren Namen verdanken, jene viele Disziplinen, die eine schier unübersehbare Fülle an Phänomenen und Prozessen auf und unter der Erdoberfläche ordnen und miteinander verknüpfen.

Dabei gilt es Fragen zu beantworten, alte Fragen zur Erkenntnis unserer Welt, die schon die abendländischen Wissenschaften begründet hatten. Auf den Einwurf, man könne Erkenntnisse über die Welt auch an der Diskussion über eine Orange erwerben, antwortete Karl Popper (1998): „Es ist auf jeden Fall nützlich, sich von Zeit zu Zeit daran zu erinnern, dass unsere abendländische Wissenschaft – und es gibt wohl keine andere – nicht damit begonnen hat, Beobachtungen über Orangen zu sammeln, sondern damit, kühne Theorien über die Welt aufzustellen“. Und das gilt noch heute: Wir brauchen kühne Theorien, und wir brauchen neue Beobachtungen, um diese kühnen Theorien zu überprüfen.

Die Theorien gehen zurück auf Empedokles, auf Thales, auf Anaximander und auf Xenophanes, um hier nur einige der ältesten „alten

Griechen“ zu nennen. Mit ihnen begannen die Naturwissenschaften und die Physik, welche zunächst die Erde als Gegenstand hatte und somit im Grunde eine Geophysik war. Diese Einheit von Physik und ihrem Gegenstand Erde blieb über die Jahrhunderte, ja Jahrtausende erhalten: über Galileo, Newton, Gilbert und Gauß, um auch hier nur wenige zu nennen.

Erst mit dem Beginn des 20. Jahrhun-



derts endete diese Einheit – allerdings nicht deshalb, weil die Erde erforscht und bekannt war. Tatsächlich war sie zu dieser Zeit noch weitgehend unbekannt. Aber die Erde war nun „irdisch“ geworden, man hatte erkannt, dass auch sie den nun bekannten physikalischen Gesetzen folgte – vielleicht mit wenigen Ausnahmen. Typisch für diese Situation ist die Bemerkung von Albert Einstein, der nach der Veröffentlichung seiner speziellen Relativitätstheorie um 1905 gesagt haben soll, dass zu den wichtigsten ungelösten Problemen der Physik die Ursache des Erdmagnetfeldes gehöre.

Im Rückblick versteht man diese Bemerkung, aber anders, als man es damals vermutet hatte: Den Schlüssel für das „Rätsel Erdmagnetfeld“ lieferte nicht ein neues physikalisches Gesetz, sondern der damals noch unbekannt Aufbau der Erde,

ihre Unterteilung in Kruste, Mantel, äußeren flüssigen und inneren festen Kern.

Die Physik wandte sich der Suche nach grundlegend neuen Gesetzen zu, während die Geophysik danach strebte und heute noch danach strebt, mit den bekannten physikalischen Gesetzen die unendlich komplizierte Erde mit ihren Gebirgen, Erdbeben, Vulkanen und dem Klima zu verstehen.

Mit der Geophysik nahmen die Mineralogie und Geologie gleichermaßen die Methoden der Physik und der Chemie in ihr analytisches Inventar auf und bildeten zusammen die Geowissenschaften.

Verglichen mit der Entdeckung der fundamentalen physikalischen Gesetze der Mechanik und Elektrodynamik wurde die innere Struktur der Erde erst spät aufgedeckt: 1909 entdeckte der kroatische Wissenschaftler Mohorovicic mithilfe seismischer Messungen die untere Begrenzung der Erdkruste, die Mohorovicic-Diskontinuität (kurz „Moho“ genannt) und führte damit die Existenz einer „Erdkruste“ in unser Bild von der Erde ein. Diese Erdkruste ist unter den Kontinenten 30 bis 40 km dick, unter den Ozeanen etwa 10 km. 1912 gelang es dem deutschen Seismologen Beno Gutenberg, die Tiefe des Erdkerns mit knapp 3000 km zu bestimmen. Der Bereich zwischen der Moho und dem Erdkern wurde von dem deutschen Geophysiker Emil Wiechert als Erdmantel bezeichnet, der im Wesentlichen aus magnesiumhaltigen Silikaten besteht. Der britische Geophysiker Harold Jeffreys wies dann 1926 nach, dass der Erdkern aus flüssigem Eisen besteht. Schließlich gelang es der dänischen Seismologin Inge Lehmann 1936, zwischen einem äußeren flüssigen und einem festen inneren Kern, die beide aus Eisen bestehen, zu unterscheiden. Mit zunehmender Kenntnis über das Erdinnere wurden eine Reihe möglicher physikalischer Ur-

Prof. Dr. Rolf Emmermann,
Prof. Dr. Volker Haak, GeoForschungsZentrum
Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

sachen für das Magnetfeld der Erde diskutiert. Heute ist man sich einig, dass der flüssige äußere Erdkern die Quelle für das Magnetfeld ist.

Schon 1912, also fast gleichzeitig mit diesen bereits recht konkreten Vorstellungen über den statischen Aufbau der Erde, entwickelte vor allem Alfred Wegener Vorstellungen über Bewegungen der Kontinente auf der Erdoberfläche. Diese Vorstellungen konkretisierten sich aber erst ein halbes Jahrhundert später und führten auf die Plattentektonik, die viele dominante Phänomene auf der Erde systematisch erklärt: Erdbeben, Gebirge und Vulkane lernte

differenzierten sich die Gesteine und bildeten sich die Kugelschalen. Soweit eine der „kühnen Theorien“ für den Beginn der Erde. Welche kühne Theorie können wir für die Zukunft der Erde anbieten?

Ohne Zweifel wird die Erde kälter, da sie immer mehr an innerer Energie verliert und damit den „Treibstoff“, der alles antreibt. Wie kalt ist die Erde schon geworden? Wann werden die Erdbeben aufhören? Wird das Erdmagnetfeld verschwinden und wann? Endet die Erde wie Mars, Venus, Merkur und Mond? Gab es dort einmal ein analoges „System Erde“? Warum,

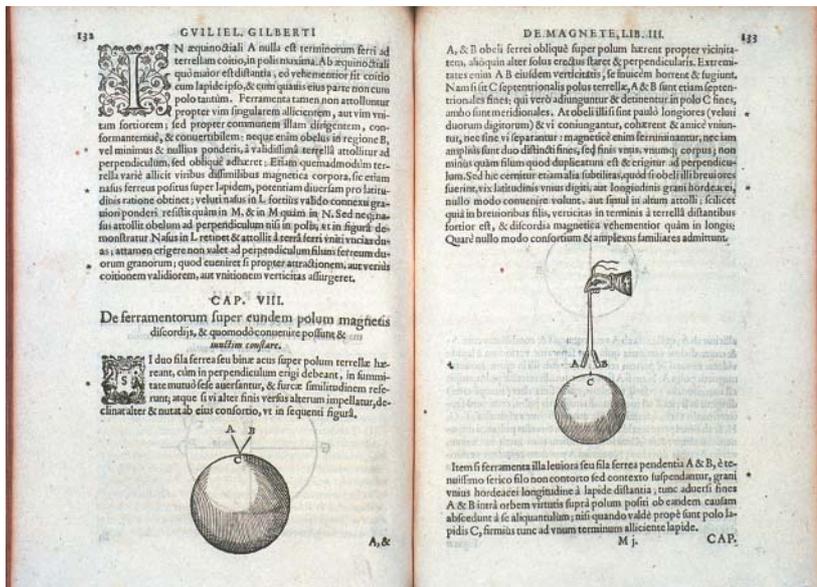
Diese Energie muss jene Massenbewegungen antreiben, die das Gesicht der Erde formen und ihre Entwicklung bestimmen.

Was wissen wir über den Erdmantel? Der Seismologie ist es mithilfe von Erdbebenwellen gelungen, Strukturen, Grenzflächen und physikalische Eigenschaften zu bestimmen. Warum diese Eigenschaften so sind wie sie sind kann die Mineralphysik aufklären. Sie verbindet mithilfe der Thermodynamik physikalische Prozesse mit physikalischen Eigenschaften und damit Strukturen, Stoffbestand und Vorgänge im Erdinnern miteinander.

Ein besonderer Aspekt der modernen Mantelseismologie ist die weltweite Kartierung der Phasengrenzflächen, die sich in Tiefen von etwa 410 km und 660 km befinden. Ihre unterschiedlichen Tiefen zeigen direkt laterale Temperaturvariationen an, die globale Konvektionsprozesse antreiben. Heute herrscht weitgehende Übereinstimmung darin, dass es diese Vorgänge im Erdmantel sind, die das komplizierte Bild der Erdoberfläche mit den Ozeanen, Kontinenten und Gebirgen geschaffen haben und für Katastrophen, Vulkanausbrüche und Erdbeben verantwortlich sind. Unklar ist aber die direkte Zuordnung von bestimmten Prozessen des Erdmantels zu einzelnen Phänomenen auf der Erdoberfläche.

Die Konvektion liefert nicht nur den Schlüssel für die Dynamik des Erdmantels, sondern auch für die Entstehung des Erdmagnetfelds ein Stockwerk tiefer, im flüssigen äußeren Erdkern. Die hierzu notwendigen physikalischen Prozesse werden in dem Begriff „Geodynamo“ zusammengefasst und sind Inhalt des zweiten Artikels. Weitgehende Übereinstimmung besteht darüber, dass die Konvektion ihre Energie aus der Wärme und aus der Auskristallisation des inneren Erdkerns gewinnt. Allerdings ermöglicht erst der Einfluss der Coriolis-Kraft (Rotation der Erde) auf die Bewegungsbahnen des flüssigen Eisens, dass thermische Energie in mechanische und schließlich in magnetische umgewandelt wird. Da dieser Geodynamo einen flüssigen Eisenkern voraussetzt, wird er auch nur funktionieren, solange der Kern flüssig ist. Das ist aber eine Frage der Alterung, der Entwicklung der Erde. Es spricht einiges dafür, dass Mond und einige Planeten bereits diesen späten Entwicklungsstand erreicht

Zwei Seiten aus dem Buch „De Magnete“ (1600) von William Gilbert. Gilbert behauptete ganz richtig, dass die Erde ein natürlicher Magnet ist, dessen Pole nahe der geographischen Pole liegen. (Quelle: Smithsonian Institution Libraries)



man so zu verstehen. Das heute im Brennpunkt der Geowissenschaften stehende „System Erde“ umfasst neben der Plattentektonik das Klima, das Magnetfeld der Erde, die Meere und die arktischen Gebiete. Dem Menschen wird immer stärker bewusst, dass diese Faktoren seinen Lebensraum und dessen Zustand bestimmen. Der Mensch kehrt also wieder dorthin zurück, wo er bei den „alten Griechen“ schon war, nämlich zum Mittelpunkt des Systems Erde. Dabei stehen die Fragen im Vordergrund, wie das System Erde funktioniert, welche Eingriffe es stören können und wie es stabilisiert werden kann, damit die Lebensgrundlagen erhalten werden.

Hier soll es aber nicht um das System, sondern um den Planeten Erde gehen, der vor 4,5 Milliarden Jahren aus dem kosmischen Staub des proto-solaren Systems gebildet und dabei mit einer ungeheuren Menge innerer Energie ausgestattet wurde. In der abkühlenden Erde

wann, wieso hörte es auf oder war niemals dort? Oder ist die Erde am Ende einzigartig im Universum? Alles Fragen, die noch ohne Antworten sind.

Die Artikel in diesem Schwerpunkt handeln von Mantel, Magnetfeld sowie von den Eigenschwingungen der Erde. Die drei ausgewählten Forschungsgebiete versuchen jenes „Material“ zu liefern, mit dem sich die Fragen nach Ursprung und Zukunft der Erde beantworten lassen. Natürlich können hier nicht alle Bereiche der Erdwissenschaften zu Worte kommen, die sich auf diese Frage konzentrieren, aber die drei erwähnten Themen sind sicher grundlegend wichtig für ihre Beantwortung.

Der erste Artikel befasst sich mit dem Erdmantel, dessen besondere Bedeutung in dem ungeheuren Reservoir an innerer Energie liegt, die zwischen den Extremen, dem heißen Erdkern und dem absolut kalten Universum gespeichert ist.

haben, vor dem die Erde noch steht. Somit ist das Erdmagnetfeld offensichtlich ein Sensor für den Reifezustand des Planeten Erde: Die Intensität seiner säkularen Schwankungen, die Häufigkeit seiner Umpolungen zeigen die Vitalität, die „Jugendlichkeit“ des Erdkerns an.

Für die Menschheit unmittelbar von Bedeutung ist auch die Tatsache, dass ein starkes Magnetfeld, wie wir es heute haben, Kommunikations- und Navigationssatelliten gegen den hochenergetischen Sonnenwind zu schützen. Eine sehr starke Reduktion dieser Feldstärke für einige tausend Jahre, wie sie bei Umpolungen in der Erdvergangenheit wahrscheinlich der Fall waren, würden neue und stabile Technologien erfordern.

Der dritte Artikel befasst sich mit Eigenschwingungen der ganzen Erde. Diese Eigenschwingungen können durch Kräfte von außen angeregt werden, wie der Einschlag eines Asteroiden, oder auch von innen, wie Erdbeben. Die Beobachtung und Analyse dieser Eigenschwingungen ist für sich genommen schon ein eigenes Kapitel der

Physik. Interessant sind diese Schwingungen vor allem deshalb, weil sie sehr stark vom Aufbau der Erde aus Materialien mit unterschiedlichen viskosen Eigenschaften und unterschiedlicher Dichte abhängen. Diese Eigenschaften und ihre zeitlichen Änderungen sind sensible Indikatoren für die Alterungsprozesse der Erde. Zu den modernsten und empfindlichsten Sensoren dieser Eigenschwingungen gehören die supraleitenden Gravimeter, die in einem internationalen Verbund, dem *Geodynamic Gravimeter Program*, betrieben werden. Das Erdmagnetfeld wird jetzt seit etwa 150 Jahren beobachtet, und in dieser Zeit wurden verschiedene Arten der Änderung der Magnetfeldstärke beobachtet. Es wäre eine interessante Frage, inwieweit 150 Jahre Beobachtung der Eigenschwingungen der Erde bereits jetzt Änderungen in diesem Spektrum ergeben hätten.

Wir wissen heute sehr viel über den Aufbau und Zustand der Erde, über die in ihr stattfindenden physikalischen Prozesse, und verbessern ständig die Methoden der Beobachtung und der Modellierung. Inso-

fern können wir bereits Antworten darauf geben, was die Erde ist, wir brauchen keine „kühnen Theorien“ mehr. Es sei denn, dass wir wissen wollen, wie das System Erde mit dem höheren Leben, mit dem Menschen gekoppelt ist. Vielleicht haben wir die Antwort schon „beobachtet“, aber sie nicht verstanden; denn es fehlen eben doch die kühnen Theorien, die uns die Antworten deuten und sagen, was die Erde ist. Die Antworten werden kaum unser tägliches Leben beeinflussen, aber sie beschäftigen uns. Es sind wesentliche Fragen des Menschen. So knüpfen wir wieder dort an, wo die Physik vor 2500 Jahren als Geophysik begann.

Literatur

- [1] *Empedokles*, Aus dem Gedicht „Über die Natur“, Aus: Die Vorsokratiker, Auswahl von Wilhelm Nestle, Eugen Diederichs Verlag, Düsseldorf-Köln, 1956
- [2] *Karl Popper*, Die Welt des Parmenides, S. 33., Piper Verlag München, 2001