



Es war eine eigenartige Entdeckung, die die Chinesen gemacht hatten: Wenn sie mit bestimmten Steinen einige Male über eine Eisennadel strichen und diese dann frei beweglich aufhängten, richtete sich die Nadel immer in Nord-Süd-Richtung aus. Schnell erkannten sie, dass sich auf diese Weise ein nützliches Navigationsinstrument bauen ließ – der **magnetische Kompass** war erfunden. Allerdings streiten sich die Historiker, ob die Chinesen dieses Instrument tatsächlich schon 2500 v. Chr. einsetzten oder erst 271 n. Chr.. Die älteste schriftliche Überlieferung über die Benutzung eines Kompasses

gelangen dem späteren Leibarzt der englischen Königin Elisabeth I., William Gilbert. Seine 1600 in London veröffentlichte Schrift „Über den Magneten“ ist ein Meilenstein der wissenschaftlichen Weltliteratur. Das Werk gab zum ersten Mal eine rationale Erklärung für die mysteriöse Eigenschaft der Kompassnadel, sich in Nord-Süd-Richtung auszurichten: die Erde selbst ist magnetisch. In seinen Experimenten benutzte Gilbert einen kugelförmigen Magneten als Modell. Indem er eine kleine Kompassnadel über dessen Oberfläche bewegte, reproduzierte er das Richtungsverhalten des Kompass auf der Erde. Knapp

Die Magie des Magnetfelds – Forschen am Mittelpunkt der Erde

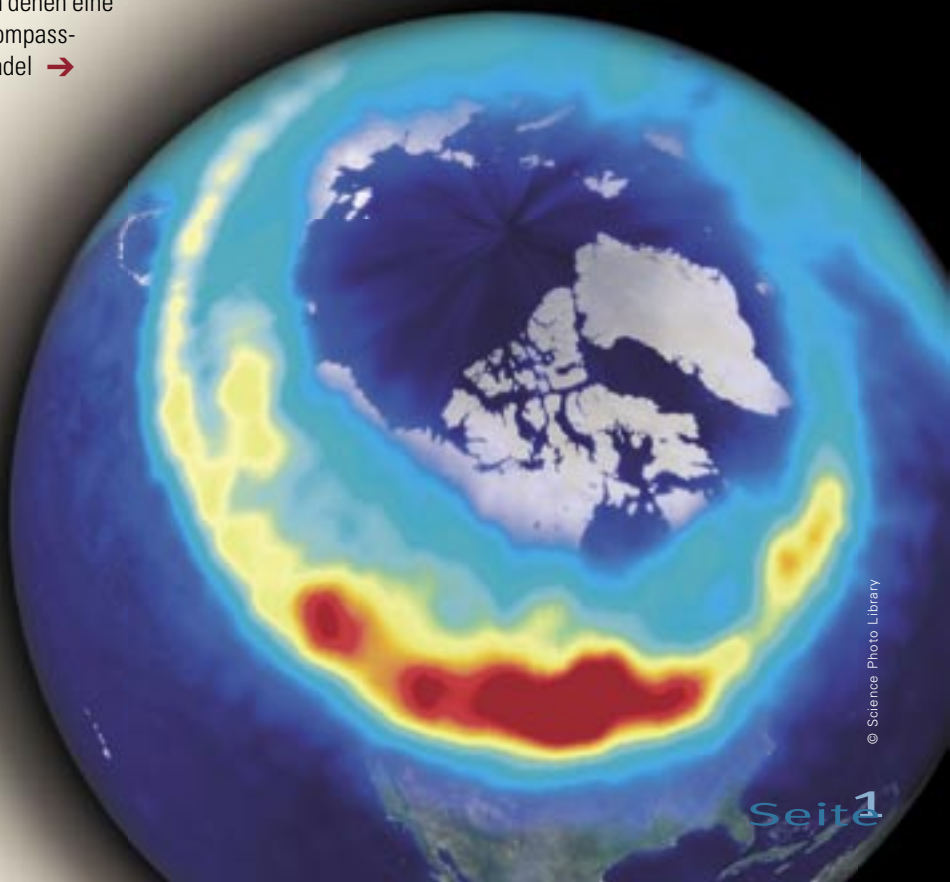
in Europa stammt aus dem Jahr 1195 n. Chr.. Anfang des 14. Jahrhunderts wurde diese „Wundernadel“ zu einer der wichtigsten Grundlagen, die es portugiesischen, spanischen und dann auch englischen Seefahrern ermöglichte, die Welt zu entdecken. Egal, ob Columbus, Magellan oder gänzlich unbekannte Abenteurer – kein Kapitän ging mehr auf große Fahrt über die Weltmeere, ohne einen Kompass an Bord zu haben.

ein hundred Jahre später lag schließlich die erste Karte des **Erdmagnetfelds** vor. Sie zeigte Linien, die an das Feld eines großen Stabmagneten erinnerten. Seltsam schien den Wissenschaftlern damals die Tatsache, dass es viele Stellen auf der Erde gab, an denen eine Kompassnadel →

NADEL MIT RICHTUNGSSINN

Welche Kraft die Magnetnadeln ausrichtete – darüber rätselten die Gelehrten allerdings noch lange. Die Europäer glaubten zunächst, ein riesiger Magnetberg im Norden der Erde sei dafür verantwortlich. Und es wurde dringend davor gewarnt, sich dem Koloss auf Schiffen – die zum Großteil aus Eisen bestanden – zu nähern. Erste elementare Erkenntnisse

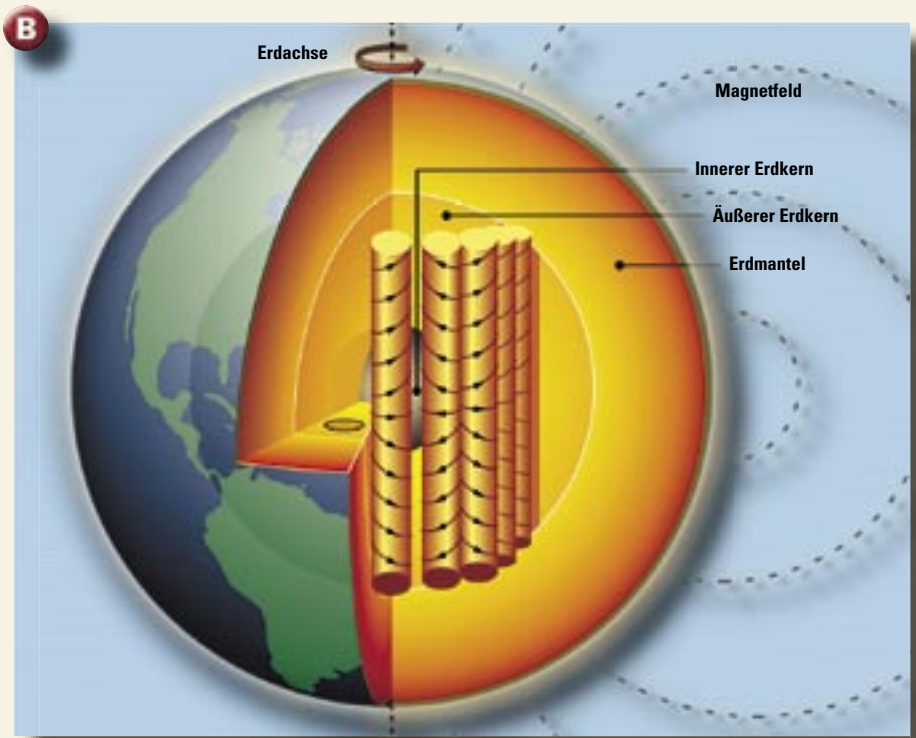
▶ **Nordlichter (Aurora borealis)** entstehen durch die Kollision von Partikeln des Sonnenwinds mit Gasmolekülen in der Erdatmosphäre. Dies geschieht vor allem in der Nähe der Pole. Hier schirmt das Erdmagnetfeld unseren Planeten nur unzureichend von der kosmischen Strahlung ab, weil die Feldlinien fast senkrecht stehen. Besonders gut wirkt das Magnetfeld dort, wo die Feldlinien parallel zur Erdoberfläche verlaufen, also am Äquator. Vom Weltraum aus gesehen bilden die Polarlichter einen großen Ring um den Nordpol. Die aktivsten Bereiche sind rot; über gelb nach blau nimmt die Aktivität ab.



→ nicht genau nach Norden zeigte und sich deren Richtung mit der Zeit sogar veränderte – zwar nur leicht, aber über einen Zeitraum von einem Jahrzehnt deutlich messbar. Heute weiß man, dass die Stärke des Erdmagnetfelds in den vergangenen 160 Jahren (seitdem lässt sich diese Größe bestimmen) um fast zehn Prozent abgenommen hat. Und dass sich das gesamte Feld mehrfach innerhalb von Millionen Jahren umpolt: Der magnetische Nordpol wird dann zum Südpol und umgekehrt (siehe Kasten S. 3).

FLÜSSIGES EISEN UNTER DRUCK

Das alles lässt sich mit dem inneren Aufbau der Erde weitgehend erklären, den Geophysiker inzwischen vor allem anhand seismologischer Messungen ermittelt haben (Abb. B). Demnach besteht der **Erdkern** zu rund 90 Prozent aus Eisen. Hier, tief im Inneren unseres Planeten, herrschen Temperaturen von über 3000 Grad Celsius. Obwohl der Schmelzpunkt von Eisen auf der Erdoberfläche bei 1539 Grad liegt, ist der innere Erdkern wegen des hohen Drucks fest. Um den Kern herum befindet sich jedoch flüssiges Eisen, das vom festen Kern erhitzt wird. An der Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase steigt heißes Eisen nach oben, kühlt sich wieder ab und sinkt dann an anderer Stelle wieder nach unten. Dabei entstehen Wirbel und Turbulenzen. Doch der Erdkern aus Eisen wirkt nicht einfach wie ein großer Dauermagnet – das können die Wissenschaftler schon allein daraus schließen, dass Magnete bei hohen Temperaturen ihre magnetischen Eigenschaften verlieren.



▲ Nach den Modellvorstellungen wird durch die Rotation der Erde das flüssige Eisen im Kern zu schraubenförmigen Bewegungen parallel zur Erdachse gezwungen.

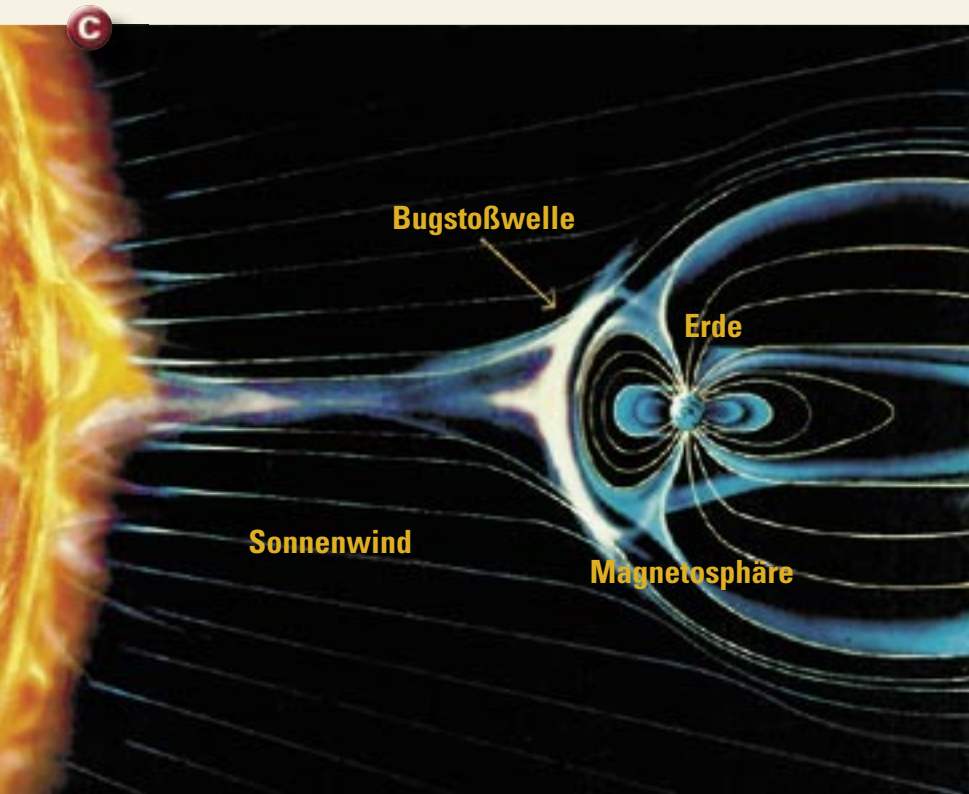
1831 entdeckte Michael Faraday die **elektromagnetische Induktion** und damit die Grundlage für einen Dynamo: Bewegt man einen elektrischen Leiter in einem Magnetfeld, so fließt ein elektrischer Strom. Umgekehrt gilt: Wo elektrischer Strom fließt, entsteht ein Magnetfeld. Und das brachte die Forscher bei der Erklärung, wie das Erdmagnetfeld entsteht, auf die richtige Spur: Zu Beginn der Erdgeschichte erzeugte wahrscheinlich der Sonnenwind ein schwaches magnetisches Feld in der Umgebung des

Planetens. Durch die Bewegung des flüssigen Eisens im Erdkern wurde ein elektrischer Strom induziert. Wie bei einem **technischen Dynamo**, zum Beispiel der Lichtmaschine im Auto, verstärkten sich Strom und Magnetfeld gegenseitig, bis der „Dynamo der Erde“ entstand. Das Erdmagnetfeld schützt vor energiereicher Strahlung aus dem All (Abb. C) und ermöglicht nicht nur Seefahrern, vor allem in den vergangenen Jahrhunderten, das erfolgreiche Navigieren, sondern auch einer Reihe von Organismen, vorausgesetzt sie sind mit einem Magnetfeld ausgestattet – dazu gehören Insekten, Vögel, Fische und Säugetiere ebenso wie Bakterien.

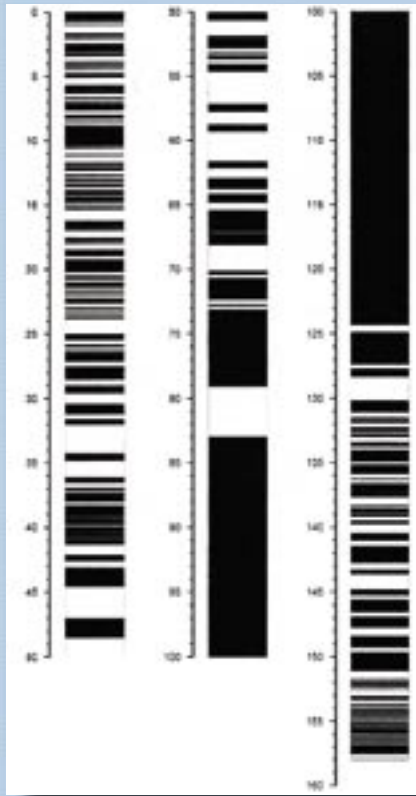
DAS GEHEIMNIS DES GEODYNAMOS

Eines war jedoch nach wie vor unklar: Ein technischer Dynamo arbeitet nur bei einer ziemlich komplizierten Anordnung von Spulen und Schleifkontakten. Der Erdkern dagegen ist quasi eine große, elektrisch leitende Kugel, in der sämtliche Bauteile

◀ Die Sonne emittiert kontinuierlich sowohl eine elektromagnetische Wellenstrahlung – ein schmales Spektrum davon ist das sichtbare Licht – als auch eine Partikelstrahlung, überwiegend Elektronen und Protonen, der Sonnenwind. Sie wirken im Wechsel mit dem Erdmagnetfeld und bilden die Magnetosphäre. Durch den Sonnenwind werden die Feldlinien auf der Tagseite stark verdichtet, auf der Nachtseite dehnen sie sich weit in den Weltraum aus. Vor dem Hindernis Magnetosphäre bildet sich im Sonnenwind eine Bugstoßwelle: hier wird der Sonnenwind von Überschall- auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst.

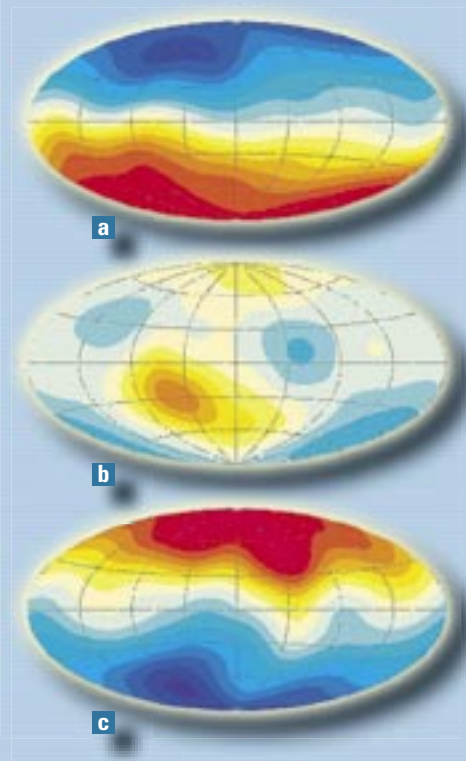


© MPI für Sonnensystemforschung



◀ Aus Gesteinsanalysen ist bekannt, dass sich das Magnetfeld der Erde in der Vergangenheit mehrfach umgepolzt hat (Phasen normaler/heutiger Polarität sind schwarz, umgekehrte Polaritäten weiß gekennzeichnet). Die Intervalle zwischen Polaritätswechseln variieren in weiten Grenzen, von nur wenigen zehntausend bis zu zehn Millionen Jahren. Längere Zeiträume sind durch häufige, andere durch relativ wenige Umpolungen charakterisiert.

▶ Forscher haben den möglichen Verlauf einer Umpolung per Computersimulation nachvollzogen: Der „magnetische Fluss“ (in die Erde hinein rot und aus der Erde heraus blau dargestellt) nimmt zunächst über mehrere Jahrhunderte hinweg ab (a). Dann löst sich die normale, dipolare Struktur des Magnetfelds auf. Auf dem Höhepunkt der Umpolung liegt ein schwaches, aber geometrisch kompliziertes Muster mit mehr als zwei Magnetpolen vor (b). Schließlich bilden sich neue Pole mit umgekehrten Vorzeichen (c). Warum dies geschieht, ist unklar. Die letzte Umpolung liegt etwa 780.000 Jahre zurück. Wenn sich die gegenwärtige Abnahme des Magnetfelds fortsetzt, wäre die nächste in – erdgeschichtlich betrachtet – naher Zukunft zu erwarten, das heißt aber frühestens in etwa anderthalb Tausend Jahren.



© MPI für Sonnensystemforschung

elektrisch kurzgeschlossen sind. Wie kommt es, dass ein solch **homogener Dynamo** trotzdem funktioniert? Eine Antwort auf diese Frage fanden die Wissenschaftler mittels Computersimulationen: Während es bei einem technischen Dynamo entscheidend ist, wie die Stromleiter geführt werden, muss im Erdkern die Strömung des Eisens bestimmte, relativ komplizierte Formen aufweisen. Besonders leicht entsteht ein Magnetfeld beispielsweise, wenn sich die Eisenströme wie auf Korkenzieherbahnen bewegen.

Am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau befasst sich Ulrich Christensen seit rund acht Jahren mit der Erforschung des **Geodynamos**. Der Forscher war weltweit einer der ersten, dem es gelang, diesen per Computer zu modellieren. Schmunzelnd erinnert sich Christensen an einen Forschungsaufenthalt 1997 in den USA: „Die frühen Modelle des Geodynamos benötigten monatelange Rechenzeiten auf den besten Supercomputern. Unserer Arbeitsgruppe standen aber nur kleine Rechner zur Verfügung – wir haben deshalb zunächst nicht geglaubt, dass wir große Beiträge zur Erforschung des Geodynamos liefern

könnten.“ Christensen und seine Kollegen beschränkten sich auf einfache Modelle, die sie auf einer kleinen Workstation realisierten: „Wir stellten uns den Erdkern als virtuelle Kugel aus flüssigem Eisen vor und ließen diese in einem Magnetfeld rotieren.“ Die Wissenschaftler wollten damit grundlegende Mechanismen der Entstehung des Erdmagnetfeldes untersuchen. „Große Hoffnung, dass wir damit ein Modell für einen sich selbst erhaltenden Dynamo entwickeln könnten, hatten wir nicht“, erinnert sich der Max-Planck-Direktor.

ERFOLGREICHES SPIEL AM COMPUTER

Doch die Forscher hatten Glück. Zufällig wählten sie Bedingungen für ihr virtuelles Experiment – beispielsweise für die Rotationsgeschwindigkeit der Kugel und die Zähigkeit des Eisens –, unter denen sich das Magnetfeld plötzlich verstärkte. „Bei den ersten Versuchen brach das System allerdings regelmäßig zusammen, wenn wir das äußere Magnetfeld abschalteten“, berichtet Christensen. Aber die Wissenschaftler gaben nicht auf und wurden schließlich für ihre Hartnäckigkeit belohnt. Es gelang ihnen,

Bedingungen für ihren virtuellen Dynamo festzulegen, unter denen er ohne äußeres Magnetfeld arbeitete. Mit weit weniger Rechnerleistung als andere Gruppen hatten die Forscher ein Modell für den Geodynamo geschaffen. „Und weil dieses Modell vergleichsweise einfach war, haben wir damit sehr viel über die Mechanismen erfahren, die für die Erzeugung des Erdmagnetfelds verantwortlich sind“, sagt Christensen.

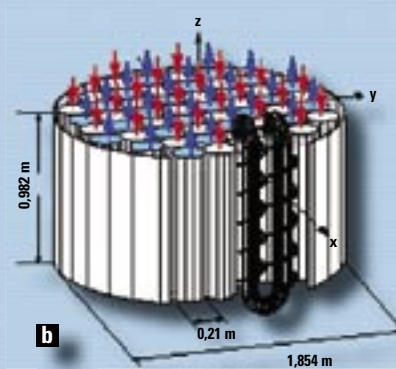
Allerdings produziert nicht einmal ein einfacher Fahrraddynamo Licht, ohne dass jemand in die Pedale tritt. Es stellt sich also die Frage: Was treibt den gewaltigen Dynamo der Erde an? Woher stammt die Energie, die dazu nötig ist? Diesem Problem widmete sich der Forscher mit wesentlich leistungsfähigeren Rechnern. Und diese lieferten dann auch sehr viel genauere Daten über die Stärke und die zeitlichen Veränderungen des Erdmagnetfelds sowie dessen großräumige Struktur auf der Erdoberfläche. Bei allem Fortschritt in der Computertechnik müssen Ulrich Christensen und seine Kollegen jedoch nach wie vor Kompromisse eingehen. Damit die aufwändigen mathematischen Modelle nicht extrem lange Rechenzeiten →

EIN GEODYNAMO IM LABOR

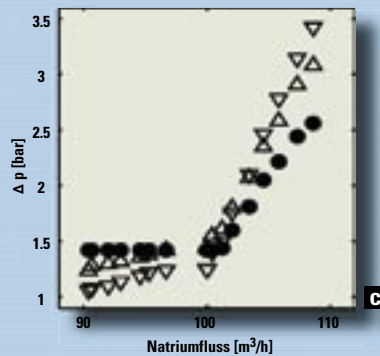
Der Dynamo der Erde wird als homogen bezeichnet, da alle „Bauteile“ elektrisch kurzgeschlossen sind. Dies lässt sich im Labor anhand des so genannten Karlsruher Dynamo-Experiments modellieren. Flüssiges Natrium (Schmelzpunkt = 98 °C) wird mit zunehmender Geschwindigkeit durch Röhren aus Edelstahl gepumpt (a + b), die sich gegenseitig berühren; je schneller das Natrium fließt, desto höher ist der Druck, den die Pumpen erzeugen müssen. Ab einer gewissen Geschwindigkeit steigt der Druck jedoch viel schneller, als zu Beginn des Experiments (c). Dies ist der Moment, in dem der Dynamo anspringt – ab jetzt wird Bewegungsenergie des Natriums auch in magnetische Energie verwandelt, die die Pumpen quasi zusätzlich erzeugen müssen. Aus der zusätzlichen Druckzunahme berechnen die Forscher, wie viel Energie nötig ist, um das Magnetfeld entstehen zu lassen.



a



b



c

→ in Anspruch nehmen, erhöhen sie beispielsweise die Zähigkeit des flüssigen Eisens in ihrem virtuellen Erdkern. So entstehen lediglich großräumige Flüssigkeitsbewegungen, die sich schneller berechnen lassen als die vielen kleinen Wirbel, die man in der turbulenten Strömung des realen Erdkerns erwartet. „Damit stellt sich aber die Frage, ob diese Modelle wirklich realistisch genug sind, um sie für die Berechnung des Energiebedarfs des Erddynamos heranzuziehen“, erklärt der Geophysiker.

EIN MEGA-KRAFTWERK IM ERDINNEREN

Die Antwort lieferte kein virtuelles, sondern ein reales Experiment am Forschungszentrum Karlsruhe unter der Leitung von Ulrich Müller. Zusammen mit Andreas Tilgner vom Institut für Geophysik der Universität Göttingen haben die Max-Planck-Forscher die Ergebnisse ausgewertet. Das so genannte Karlsruher Dynamo-Experiment (siehe Kasten S. 4) erlaubt es, einen homogenen Dynamo im Labor zu betreiben. Dazu wird eine Tonne

flüssiges Natrium durch ein rund ein Meter hohes Röhrensystem aus Edelstahl gepumpt. Da beide Materialien gute elektrische Leiter sind und sich die Röhren berühren, sind alle Teile elektrisch kurzgeschlossen – genau wie beim homogenen Geodynamo. Die Röhren enthalten außerdem Leitbleche, die so geformt sind, dass das flüssige Natrium wie auf Korkenzieherbahnen durch die Röhren fließt. Somit entsteht jene komplexe Strömung, die die Forscher im Erdkern vermuten, in ihren Computermodellen aber nicht berücksichtigen.

Das Ergebnis: Tatsächlich deckte sich der Wert für den Energiebedarf, den die Forscher zuvor am Computer für denselben Versuchsaufbau berechnet hatten, mit der Energie, die benötigt wurde, um den homogenen Dynamo im Labor zu betreiben. „Die komplizierten, kleinen Wirbel und Strömungen, die wir mit dem Karlsruher Dynamo-Experiment erzeugen, haben keinen Einfluss auf den Energiebedarf des homogenen Dynamos“, erklärt Christensen, „und das heißt, dass wir mit unseren Compu-

termodellen sehr wohl realistische Daten für den Geodynamo erwarten können“.

Nach diesen Berechnungen verschlingt der Dynamo der Erde zwischen 200.000 und 500.000 Megawatt – das entspricht der Leistung einiger hundert Großkraftwerke. Für ein gigantisches System wie die Erde ist dies nicht besonders viel. Die Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass der Energiebedarf durch das langsame Abkühlen des Erdkerns gedeckt wird – eine besondere Energiequelle im Kern, beispielsweise basierend auf radioaktivem Zerfall von Spurenelementen (etwa Kalium), halten sie nicht für nötig. Ein wesentlicher Teil der Energieabgabe des Kerns beruht im Übrigen darauf, dass der innere, feste Kern stetig wächst, indem flüssiges Eisen an ihm „ausfriert“. Dadurch verlieren die Eisenatome Bewegungsenergie, die dann zum Betrieb des Geodynamos zur Verfügung steht.

ÄLTER ALS BISHER GEDACHT

Mit seinen Berechnungen konnten Ulrich Christensen und sein Team auch einen wichtigen Beitrag zur Diskussion um das Alter des festen Erdkerns liefern. Laut früheren Berechnungen schätzten Experten den Energiebedarf des Geodynamos nämlich drei bis zehn Mal höher als die von den Max-Planck-Forschern berechneten Werte. Danach wäre der innere Erdkern aber auch drei bis zehn Mal schneller gewachsen und folglich nur etwa eine Milliarde Jahre alt. Gesteinsanalysen zeigen jedoch, dass das Erdmagnetfeld seit mindestens drei Milliarden Jahren existiert. Vor der Entstehung des festen Erdkerns müsste also ein völlig anderer Mechanismus für den Antrieb des Geodynamos gesorgt haben – keine sehr realistische Annahme. „Nach unseren Berechnungen kühlt sich der Erdkern deutlich langsamer ab als bisher angenommen“, erklärt Christensen. „Damit wäre der innere Erdkern 2,5 bis 3,5 Milliarden Jahre alt. Und das stimmt relativ gut mit den Ergebnissen aus Gesteinsanalysen überein.“

Schlagwörter: magnetischer Kompass, Erdmagnetfeld, Erdkern, elektromagnetische Induktion, Dynamo

Leseempfehlungen: „Expedition Erde“: Beiträge zum Jahr der Geowissenschaften 2002 (zu bestellen unter <http://www.marum.de/Shop.html>)

Internet: <http://www.phy6.org/earthmag/Dmagint.htm>

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-reihe.mpg.de

BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erscheinen jeweils zweimal im Jahr und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse aus den Max-Planck-Instituten vor allem für Lehrer und Schüler. Weitere Exemplare können unter folgender Adresse kostenlos bestellt werden: