

GEOPHYSIK

Erd-Dynamo zieht Kraft aus Wärme

Das Magnetfeld der Erde entsteht im flüssigen äußeren Eisenkern in etwa 3000 Kilometer Tiefe. Durch den Wärmefluss vom Erdkern in den Gesteinsmantel setzt sich das flüssige Eisen in Bewegung, ähnlich wie Wasser in einem geheizten Kochtopf. Diese Bewegungen des elektrisch leitenden Eisens führen zum „Dynamo-Effekt“: Sie induzieren elektrische Ströme, deren Magnetfeld an der Erdoberfläche wirksam und messbar wird. Ulrich Christensen vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (früher: Aeronomie) in Katlenburg-Lindau und Andreas Tilgner vom Institut für Geophysik der Universität Göttingen haben jetzt mit Computersimulationen und Laborexperimenten gezeigt, dass der Betrieb des Geodynamos lediglich die Energie von einigen Hundert großen Kraftwerken erfordert – wesentlich weniger als bisher angenommen. (NATURE, 13. Mai 2004)

mus im flüssigen Eisenkern verantwortlich: Strömungen elektrisch leitender Materie rufen beim Durchqueren eines vorhandenen schwachen Magnetfelds durch Induktion elektrische Ströme hervor, die ihrerseits wieder Magnetfelder erzeugen. Dadurch kommt es zu einem wechselseitigen Hochschaukeln und es treten messbare Magnetfeldstärken auf. Doch wie viel Energie ist tatsächlich erforderlich, um einen solchen Geodynamo zu betreiben? Um diese Frage zu beantworten, haben die Wissenschaftler jetzt Computermodelle des Geodynamos mit Ergebnissen aus Laborexperimenten kombiniert. Ihre Computersimulationen können die Stärke, die zeitliche Veränderung und die großräumige Struktur des an der Erdoberfläche beobachteten Magnetfelds gut erklären. Doch für den Energiebedarf sind die im Erdkern vorhandenen kleinen Strukturen des Magnetfelds entscheidend, die sich unserer Beobachtung allerdings entziehen. Ob sie in den Computermodellen richtig wiedergeben werden, ist also zunächst unsicher, denn die Simulationen erfassen nur den großräumigen Anteil der Flüssigkeitsbewegung. Die kleinen Wirbel, die in der turbulenten Strömung des Erdkerns zu erwarten sind, müssen durch Annahme einer zu hohen Zähigkeit unterdrückt werden, um die Modelle praktikabel zu halten. Um zu klären, welchen Einfluss nun die kleinen Wirbel haben, nutzten die Geoforscher das sogenannte Karlsruher Dynamo-Experiment. In diesem Versuchsaufbau strömt flüssiges Natrium durch ein System von Kanälen, die einen metergroßen Zylinder formen. Ist die Pump-rate hoch genug, springt der Dynamo an und erzeugt ein Magnetfeld, das etwa 100fach stärker ist als jenes der Erde.

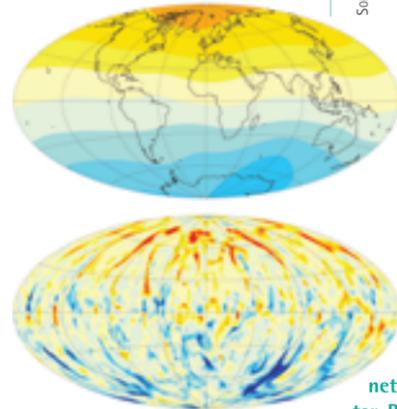


FOTO: MPI FÜR SONNENSYSTEMFORSCHUNG

Simulation: Das Erdmagnetfeld im Computer. Blaue Farbtöne zeigen einen „magnetischen Fluss“ nach außen, rote Farbtöne einen Fluss nach innen. An der Oberfläche des Erdkerns (unten) ist das Magnetfeld viel kleinräumiger und komplexer als an der Erdoberfläche (oben).

Im Gegensatz zur Computersimulation ist die Strömung hierbei turbulent, umfasst also auch die Wirbelkomponente. Der Leistungsbedarf des experimentellen Dynamos passt sich gut in die aus den Modellen abgeleitete Systematik ein. Die Wirbel haben demnach keinen entscheidenden Einfluss auf die elektrische Verlustleistung. Die Leistung des Geodynamos beträgt nach den neuen Modellen etwa 200 000 bis 500 000 Megawatt – entsprechend etwa der Leistung von einigen Hundert Großkraftwerken. Verglichen mit früheren Schätzungen ist das relativ moderat. Daraus folgern die Wissenschaftler, dass es keiner besonderen Wärmequelle im Erdkern bedarf, dass der Dynamo vielmehr durch die langsame Abgabe der seit der Erdentstehung im Kern gespeicherten Wärme betrieben wird. Mit der Abkühlung friert das flüssige Eisen aus. Dadurch wächst der feste innere Erdkern. Nach den bisherigen Annahmen wäre die Abkühlung sehr rasch erfolgt, sodass der feste innere Erdkern sich überhaupt erst vor einer Milliarde Jahre gebildet hätte. Nach den neuen Berechnungen erfolgte die Abkühlung jedoch sehr langsam; der innere Kern ist demnach bereits älter als drei Milliarden Jahre und damit nicht viel jünger als die Erde insgesamt.



@ Weitere Informationen erhalten Sie von:
PROF. ULRICH CHRISTENSEN
 Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau
 Tel.: 05556 979-542/467
 Fax: 05556 979-219
 E-Mail: christensen@linmpi.mpg.de



Praktischer Versuch: Im Karlsruher Dynamo-Experiment wird flüssiges Natrium durch ein Röhrensystem gepumpt, um einen Geodynamo künstlich zu erzeugen.

Die Energie des Geodynamos stammt von der seit Geburt der Erde in deren Kern gespeicherten Wärme. Diese Wärme wird so langsam abgegeben, dass der durch Ausfrieren des flüssigen Eisens entstehende innere Erdkern bereits mehr als 3 Milliarden Jahre alt sein könnte. Der Befund stimmt mit dem Nachweis einer Magnetisierung in ebenso alten Gesteinen überein. Die Erde misst 12 740 Kilometer im Durchmesser und beherbergt eine Reihe von Naturphänomenen, darunter auch das Magnetfeld, an dem sich eine Kompassnadel ausrichtet. Nach den gängigen Theorien ist dafür ein Dynamo-Mechanismus

KOLLOIDFORSCHUNG

Das Rollkommando der Immunabwehr

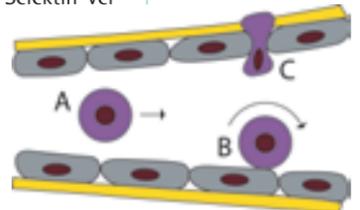
Weiße Blutzellen, Leukozyten, sind die wichtigsten Werkzeuge der Immunabwehr: Wo immer es darum geht, Erreger zu bekämpfen oder geschädigtes Gewebe zu beseitigen, sind sie zur Stelle – und dringen aus der Blutbahn in das Gewebe und dort an den Ort der Verletzung oder Entzündung vor. Dieser Einmarsch muss rasch und gezielt erfolgen. Dazu trägt entscheidend bei, dass Leukozyten auf ihren „Streifengängen“ nicht einfach passiv und frei im Blutstrom mitschwimmen, sondern dicht an der Innenwand der Blutgefäße entlang „rollen“. Details dieser Fortbewegung durch so genannte rollende Adhäsion hat jetzt Ulrich Schwarz vom Potsdamer Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung gemeinsam mit Wissenschaftlern des Weizmann-Instituts in Israel aufgeklärt. (PNAS, Early Edition, 20. April 2004)

Um ihre Funktionen im Rahmen der Immunabwehr zu erfüllen, müssen die jeweils zuständigen Sorten von Leukozyten am richtigen Ort von den Blutgefäßen aus in das geschädigte und gefährdete Gewebe einwandern. Die dafür notwendigen Informationen erhalten sie über Substanzen, die als Notsignale und Wegweiser vom betroffenen Gewebe aus in den Blutkreislauf eingeschleust werden. Doch diese Art „Ausschilderung“ würde wenig helfen, könnten sich die Leukozyten nicht kontrolliert längs der Gefäßwände bewegen und im Notfall genau an den Stellen innehalten und aus den Gefäßen auswandern, an denen sie gebraucht werden. Das Phänomen der „rollenden Adhäsion“ löst dieses Problem. Dazu gehören zwei Sorten Adhäsions-

moleküle: Selektine und Integrine. Sie sitzen auf der Oberfläche der Leukozyten und wirken im Zusammenspiel mit bestimmten Liganden auf den Zellen der Gefäßwände als eine Art Haftvermittler. Dabei gehen die Selektine jeweils nur eine schwache und kurzzeitige Bindung mit den Liganden auf der Gefäßwand ein – und zwar so, dass ein Leukozyt unter dem Druck des Blutstroms entlang der Gefäßwand von einer Selektinbindung zur nächsten rollt. Trifft er dabei auf Signale, die ihm einen „Notfall“ melden, werden die stärker haftenden Integrine an seiner Oberfläche aktiviert: Sie bremsen die rollende Adhäsion, und der Leukozyt dringt durch die Gefäßwand in das Gewebe und weiter an seinen Einsatzort vor. Ulrich Schwarz und seine Kollegen am Weizmann-Institut haben jetzt den Mechanismus der rollenden Adhäsion genauer untersucht. Dazu schickten sie Leukozyten durch eine Flusskammer, deren Innenwand mit Liganden für Selektine ausgekleidet war, und verfolgten dann über eine extrem schnelle Videokamera die Bewegung der weißen Blutzellen längs der Wand dieses „künstlichen Blutgefäßes“. Auf diese Weise fanden sie heraus, dass bei mäßigem Durchfluss nur sehr flüchtige Kontakte zwischen Selektinen und ihren Liganden auftreten: Für jeweils nur vier Tausendstelsekunden vermitteln sie den Zusammenhalt zwischen Gefäßwand und Leukozyten – „und damit die kurzlebigsten molekularen Bindungen, über die bislang in der biochemischen Literatur berichtet wurde“, so Schwarz. Überraschenderweise aber verlängerte sich die Lebensdauer dieser Bindungen sprunghaft von einer bestimmten höheren Durchflussrate an, und zwar um einen Faktor 14. Das war

zunächst schwer zu verstehen; denn eigentlich sollte die Dauer der flüchtigen Bindungen durch den verstärkten Strömungsdruck eher noch verkürzt werden. Doch weitere Experimente sowie Computersimulationen führten zu einer schlüssigen Deutung dieses Effekts: Wahrscheinlich werden, sobald erhöhte Scherkräfte an den Leukozyten angreifen, anstelle einer einzigen und sehr flüchtigen Bindung zwei Selektinkopplungen gebildet, die sich jeweils durch ungewöhnlich rasche Rückbindung – binnen einer Hundertstelsekunde – erneuern und somit stabilisieren. Dadurch rückt die effektive Lebensdauer der Selektin-vermittelten Bindungen bis in den Sekundenbereich. Das heißt, der Mechanismus der rollenden Adhäsion kommt erst oberhalb eines bestimmten Schwellenwerts der Strömung voll zum Tragen – und das, wie die Wissenschaftler vermuten, aus gutem, weil physiologisch einleuchtendem Grund: Das Haftvermögen der Leukozyten ist nur in den Blutgefäßen erwünscht und zweckmäßig, würde aber außerhalb der Gefäße den Weg der Abwehrzellen zu ihrem Einsatzgebiet unnötig erschweren und verzögern. Dieser neue Einblick in die Regulation der rollenden Adhäsion bei Leukozyten ist zunächst aus Sicht der Immunologie interessant. Denn es gibt Krankheiten, die auf Defekten an den Adhäsions-Molekülen gründen und beispielsweise zu Störungen der Wundheilung führen. Darüber hinaus nutzen auch Stammzellen das Phänomen der rollenden Adhäsion, wenn sie aus dem Knochenmark über die Blutbahn in ihre jeweiligen Zielgebiete wandern.

Weiße Blutkörperchen werden mit dem Blutstrom durch die Blutgefäße getragen (A). Durch schwache Adhäsionsmoleküle kommt es zur „rollenden Adhäsion“ auf den



Wänden (B). Eventuell vorhandene Stoppsignale bremsen die weißen Blutkörperchen, die sich zwischen den Zellen der Blutgefäße hindurchquetschen (C).



@ Weitere Informationen erhalten Sie von:
DR. ULRICH SCHWARZ
 Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam
 Tel.: 0331 567-9610
 Fax: 0331 567-9602
 E-Mail: ulrich.schwarz@mpikg-golm.mpg.de

GRAFIK: MPI FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG