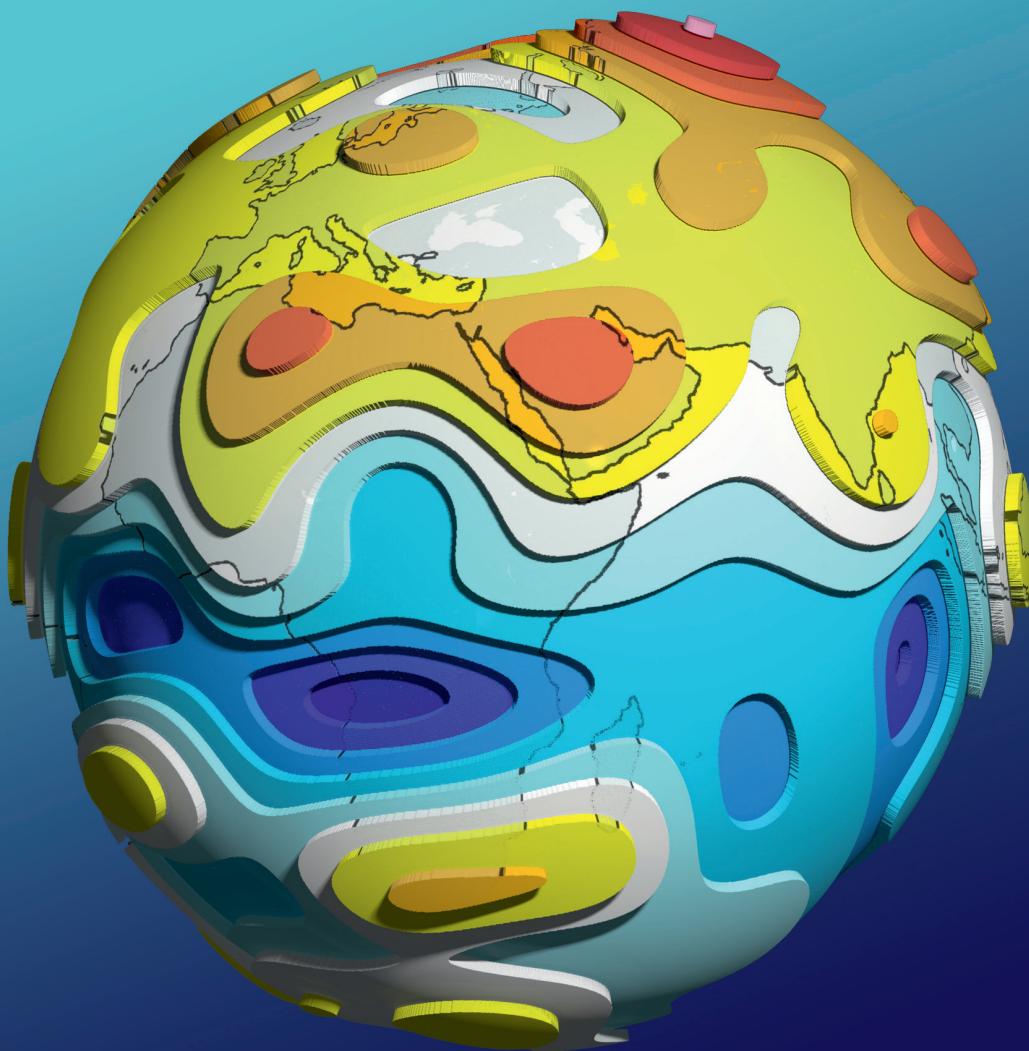


# Das Erdmagnetfeld – Fenster zum Erdkern

Ingo Wardinski, Vincent Lesur, Seiki Asari, Martin Rother, Monika Korte  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The Earth's magnetic field has undergone temporal and spatial variations including polarity reversals. Paleomagnetic and historical magnetic field measurements suggest persistent distinct patterns of variation of the geomagnetic field taking place in different regions of the Earth. At least on the millennia time scale these patterns may be explained by the thermal influence of Earth's mantle on the geodynamo. Whether this influence can already be discerned on the century time scale is still debated. Although, the Earth's interior is inaccessible for direct observations, the effects of such processes at the top of the core and below are well observed at the Earth's surface. Several observables of these processes are used to infer the dynamical regime of Earth's outer core and its interaction with its vicinity.*

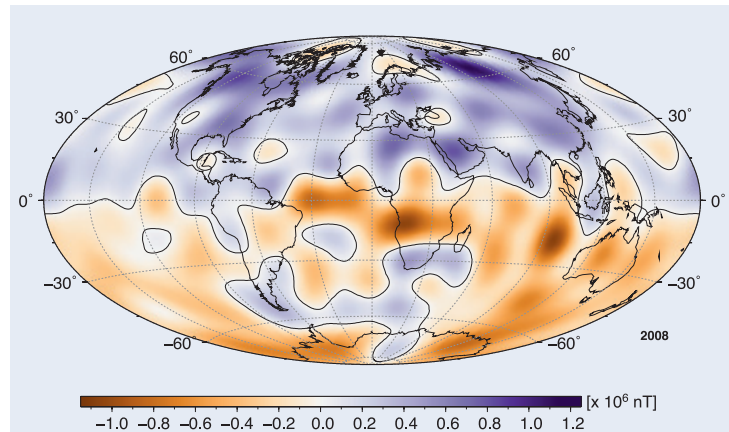


Obwohl wir das Erdmagnetfeld nicht direkt wahrnehmen können, hätte sein Fehlen unmittelbaren Einfluss auf unser Leben und auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde: Es verhindert das Eindringen hochenergetischer Teilchen aus dem interstellaren Raum und des Sonnenwindes in die Biosphäre. Ohne das Erdmagnetfeld hätte sich wahrscheinlich keine für das Leben günstige Umgebung ausgebildet. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Vergleich von Erde und Venus. Das Fehlen eines Magnetfelds bei der Venus führte vermutlich vor etwa vier Mrd. Jahren zu einem sich selbstverstärkenden Treibhauseffekt, bei dem das ursprünglich vorhandene Oberflächenwasser verdampfte und so den anfänglichen Treibhauseffekt verstärkte. In der Folge erhöhte sich der Anteil anderer Treibhausgase, die diesen Effekt weiter verstärkten. Ohne Magnetfeld war die Venus nicht in der Lage, leichte Gase wie Wasserdampf und Sauerstoff in ihrer Atmosphäre zu halten. So weist die Venus eine Oberflächentemperatur von 740 K auf und die Atmosphäre besteht im Wesentlichen aus Kohlendioxid und Stickstoff. Der Anteil von Wasserdampf beträgt 20 ppm und Sauerstoff fehlt gänzlich in der unteren Atmosphäre. Unter solchen Bedingungen erscheint die Entwicklung erdähnlichen Lebens kaum vorstellbar.

Das Magnetfeld unseres Planeten wird von einem Dynamo-Prozess im flüssigen Außenkern generiert. Diese Erkenntnis basiert auf seismologischen Erkundungen, vor allem die Entdeckung des flüssigen Erdkerns (1926) und der Entwicklung der modernen Dynamotheorie Mitte des 20. Jahrhunderts. Weitere Arbeiten von Mauersberger (1955) und Lowes (1966), die die räumliche Struktur des Magnetfelds an der Erdoberfläche untersuchten, führten zu der Erkenntnis, dass der größte Anteil des Magnetfelds im Erdkern erzeugt wird. Man bezeichnet diesen als das Hauptfeld.

*Links: Modellierung der Vertikalkomponente des Magnetfelds an der Grenze zwischen flüssigem Erdkern und darüber liegendem Mantel. Sie basiert auf dem am GFZ entwickelten Magnetfeldmodell GRIMM-2 (GFZ Reference Internal Magnetic field Model), das aus Observatoriums- und Satellitenmessdaten berechnet wurde. Die hier gewählte Projektion ist eine Vereinfachung der kontinuierlichen Flächenfunktion und hebt wichtige Eigenschaften der Morphologie des Feldes hervor. (Abbildung: M. Rother, GFZ)*

*Left: Vertical magnetic field component at the top of the liquid outer core. It is derived from GRIMM-2 (GFZ) which based on observations of the Earth's magnetic field made at geomagnetic observatories and on-board geomagnetic satellite missions. A very simplistic projection is chosen to emphasize some of the main features of the Earth's magnetic field.*



*Abb. 1: Morphologie der Vertikalkomponente des Magnetfelds an der Kern-Mantel-Grenze für das Jahr 2008. Die Nulllinie (grau) markiert im südlichen Atlantik einen großen Bereich mit entgegengesetztem magnetischem Fluss und zeigt den Verlauf des magnetischen Äquators.*

*Fig. 1: The morphology of the vertical magnetic field component computed for the epoch 2008 at the core mantle boundary. Zero-contour lines are added to aid the identification of reverse flux patches and the magnetic equator.*

Das Erdmagnetfeld unterliegt zeitlichen Schwankungen. So wissen wir aus Untersuchungen von magnetischen Gesteinen (Basalten, Diaziten, Laven), dass die Erde seit 3,5 Mrd. Jahren ein Magnetfeld besitzt, das sich in der Erdgeschichte mehrmals umgepolt hat. Bei diesen Umpolungsprozessen befindet sich das Erdmagnetfeld zuerst in einem dipolaren Zustand (zwei Pole), wobei die Achse des Dipols weitgehend mit der Rotationsachse der Erde zusammenfällt. Im Weiteren entwickeln sich immer größer werdende Abweichungen zwischen den beiden Achsen, zusätzlich verringert sich die Stärke des Dipolcharakters und multipolare Anteile werden bedeutsam. Als Folge der stärker werdenden multipolaren Anteile entwickeln sich an der Oberfläche des Außenkerns im Hauptfeld Regionen mit entgegengesetztem magnetischem Fluss. Die (Haupt-) Pole wandern äquatorwärts und es kommt zum vollständigen Umklappen der Pole. Das Feld gewinnt also zunächst an Komplexität und weist vorübergehend mehr als zwei Pole auf. Dann baut es sich mit zunehmender Stärke in umgekehrter Richtung als Dipol wieder auf. Es ist noch unklar, wie lange ein kompletter Umpolvorgang dauert. Nach aktuellem Forschungsstand geht man von wenigen Jahrtausenden aus (Nowaczyk et al., 2012).

Während der letzten Jahrtausende führten die Magnetpole häufig solche von der geographischen Achse abweichenden Bewegungen aus. In der fernerer Vergangenheit kam es jedoch mehrfach zu kompletten Umpolungen des Erdmagnet-



**Kontakt:** I. Wardinski  
(ingo@gfz-potsdam.de)

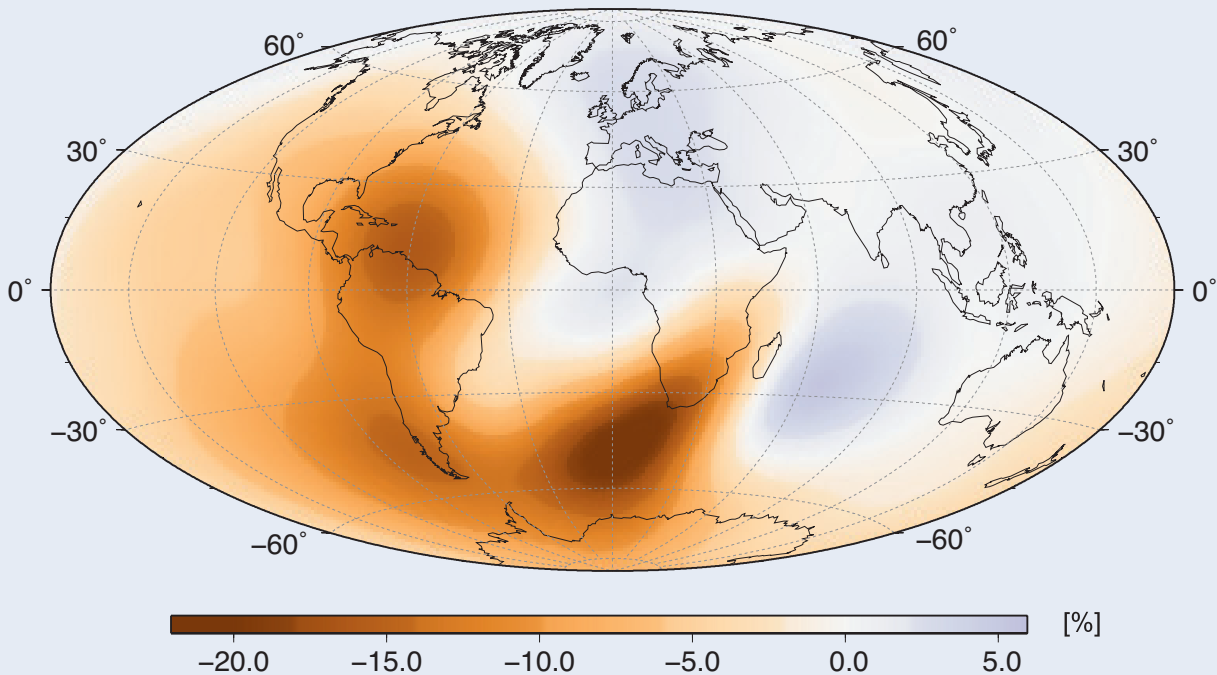


Abb. 2: Änderung der Magnetfeldstärke im Zeitraum 1957 bis 2008. Eine besonders starke Abnahme der Feldstärke um mehr als 20 % fand im Bereich des südlichen Atlantiks statt.

Fig. 2: Change of the magnetic field strength between 1957 and 2008. The largest decrease of 20 % is observed in the South Atlantic region and is known as the South Atlantic Anomaly.

felds, die letzte vor 780 000 Jahren. Im Durchschnitt fand in den letzten 80 Mio. Jahren etwa alle 500 000 Jahre eine Umpolung statt. Daraus zu schließen, dass die nächste Umkehrung schon überfällig ist, wäre jedoch zu einfach. Die Dauer einzelner Polaritätsintervalle ist sehr unterschiedlich: Während die kürzesten nur einige zehntausend Jahre anhielten, dauerte das längste über fünf Mio. Jahre. In der Kreidezeit, vor etwa 120 bis 80 Mio. Jahren, war das Feld nach heutigem Wissensstand sogar dauerhaft in der derzeitigen Polaritätsrichtung stabil. Dieser Zeitraum wird als „Cretaceous Normal Superchron“ bezeichnet.

Zurzeit beobachten wir mehrere Regionen mit entgegengesetztem magnetischem Fluss, wobei die größte im Bereich des südlichen Atlantiks liegt (Abb. 1). Zudem beschleunigt sich aktuell die Wanderung des nördlichen Magnetpols. Inwieweit diese Phänomene mit der Umpolung des Magnetfelds zusammenhängen, ist Teil der Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ.

## Modelle des Erdmagnetfelds

Die Entwicklung globaler Modelle des Erdmagnetfelds am GFZ liefert wichtige Beiträge zu den Erkenntnissen über das Erdmagnetfeld (siehe z. B. Lesur et al. 2008, 2010; Wardinski und Lesur, 2012; Korte et al., 2010). Diese Modelle basieren auf Daten geomagnetischer Satellitenmissionen und Observatorien und beschreiben das Erdmagnetfeld der letzten Dekade sowie der letzten 50 Jahre. Für längere Zeiträume beruhen die Modelle auf paläomagnetischen und historischen Messungen und geben eine Beschreibung des Erdmagnetfelds der letzten zehntausend Jahre. Diese Modelle dienen unter anderem der Datierung von Klimazeitreihen und der Charakterisierung der Ionisierung der Atmosphäre im Holozän (vgl. Artikel von Korte und Frank sowie Nowaczyk et al. in „GFZ-Journal System Erde“ (2012) Heft 1, online: <http://systemerde.gfz-potsdam.de>). Die globalen Modelle bieten zudem einen einzigartigen Zugang zu den dynamischen Prozessen im flüssigen Außenkern der Erde und den Wechselwirkungen zwischen Erdkern und -mantel. Diese Prozesse laufen auf unterschiedlichen Zeitskalen ab. Auf sehr langen Zeitskalen von einigen tausend Jahren können die Variationsmuster des

Magnetfelds mit dem thermischen Einfluss des Erdmantels auf den Erdkern erklärt werden. Dieser Einfluss lässt sich auf kürzeren Zeitskalen nicht zweifelsfrei ableiten.

Die Modelle, die das Erdmagnetfeld anhand der Beobachtungen der letzten 50 Jahre beschreiben, weisen eine eindeutige Dominanz der Dipolfeldstärke auf. Sie hat aber in diesem Zeitraum etwa 20 % ihrer Stärke verloren (Abb. 2). Ob es sich dabei um eine regelmäßige Fluktuation handelt oder um ein erstes Anzeichen einer Polumkehrung, ist noch unklar. An der Kernoberfläche beobachtet man Strukturen in der Morphologie des Magnetfelds, die auf einen solchen Umpolungsprozess hindeuten könnten. Bei diesen Strukturen handelt es sich um große Gebiete, in denen der magnetische Fluss eine umgekehrte Polarität besitzt, als in deren Umgebung. Diese treten in der Nähe des Nordpols auf, aber auch auf der südlichen Hemisphäre, unterhalb des Südatlantiks (Abb. 1).

In direktem Zusammenhang mit dieser anomalen Konfiguration des Magnetfelds an der Kernoberfläche steht die sogenannte South Atlantic Anomaly (SAA), welche auch als „Bermuda-Dreieck“ der erdnahen Satelliten bekannt ist. Dort kommt es in Zeiten erhöhter solarer Aktivität zu einem erhöhten Eintrag von hochenergetischen Teilchen in die obere Atmosphäre. Bildlich gesprochen ist diese Region eine mit hochenergetischen Teilchen gefüllte Senke. Auf dem Weg durch die SAA kommt es an Bord der Satelliten zu Überspannungen und Fehlfunktionen. Zudem erleiden betriebswichtige elektronische Teile

eine starke Verwitterung. Die genaue Kenntnis der Lage dieser Anomalie und die Beobachtung der solaren Aktivität sind daher von volkswirtschaftlichem Interesse. Denn so können Vorkehrungsmaßnahmen getroffen und damit die Lebenszeit der Satelliten verlängert werden.

## Geomagnetische Jerks

Bei den kurzzeitigen Änderungen des Erdmagnetfelds spielen die sogenannten geomagnetischen Jerks eine besondere Rolle. Diese abrupten Änderungen der Säkularvariation (erste zeitliche Ableitung des Magnetfelds) werden weltweit in geomagnetischen Observatorien beobachtet. Als Beispiel wird hier die Beobachtung der Säkularvariation am geomagnetischen Observatorium des GFZ in Niemeck vorgestellt (Abb. 3), wo mehrere dieser Ereignisse mit unterschiedlicher Intensität gemessen wurden. Im Jahr 1969 trat einer der stärksten geomagnetischen Jerks auf, ein weiteres Ereignis ist der Jerk von 2003, der erstmals in geomagnetischen Satellitendaten nachgewiesen wurde (Olsen und Manda, 2008).

Die Ursache dieser Ereignisse sind Prozesse im Erdkern. Um sowohl die kurzzeitigen (Jerks) als auch die langfristigen Variationen (Polumkehrungen) des Erdmagnetfelds verstehen zu können, werden numerische Modelle des Geodynamos entwickelt, die auf der Physik der wirkenden Kräfte und der resultierenden Bewegungen beruhen. Die Dynamik wird mit

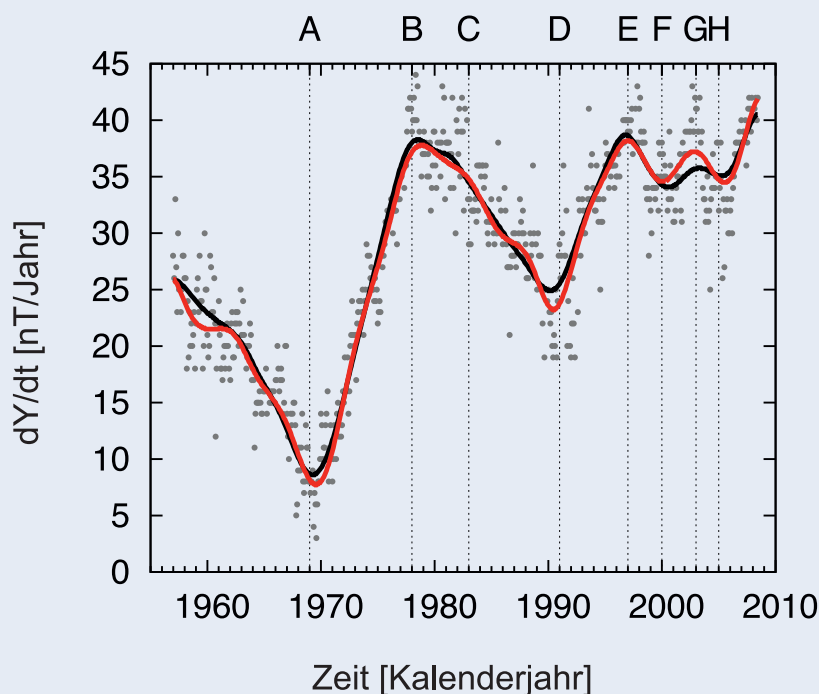


Abb. 3: Vergleich der am Geomagnetischen Observatorium des GFZ in Niemeck gemessenen geomagnetischen Säkularvariation der Ost-Komponente Y (graue Punkte) mit zwei Modellkurven (rot und schwarz). Die vertikalen gestrichelten Linien markieren das Auftreten von geomagnetischen Jerks (A bis H). Die Modellkurven basieren auf unterschiedlichen Annahmen; rot: die zeitliche Variabilität der Säkularvariation ist im Wesentlichen glatt und die Morphologie des Felds einfach; schwarz: die Säkularvariation entsteht durch die Advektion des Magnetfelds und es wird keine magnetische Diffusion beobachtet.

Fig. 3: Comparison between the observed (gray dots) and the modelled secular variation of the East-component (dY/dt) in Niemeck. The vertical lines, marked with the characters A to H, indicate occurrence times of geomagnetic jerks.



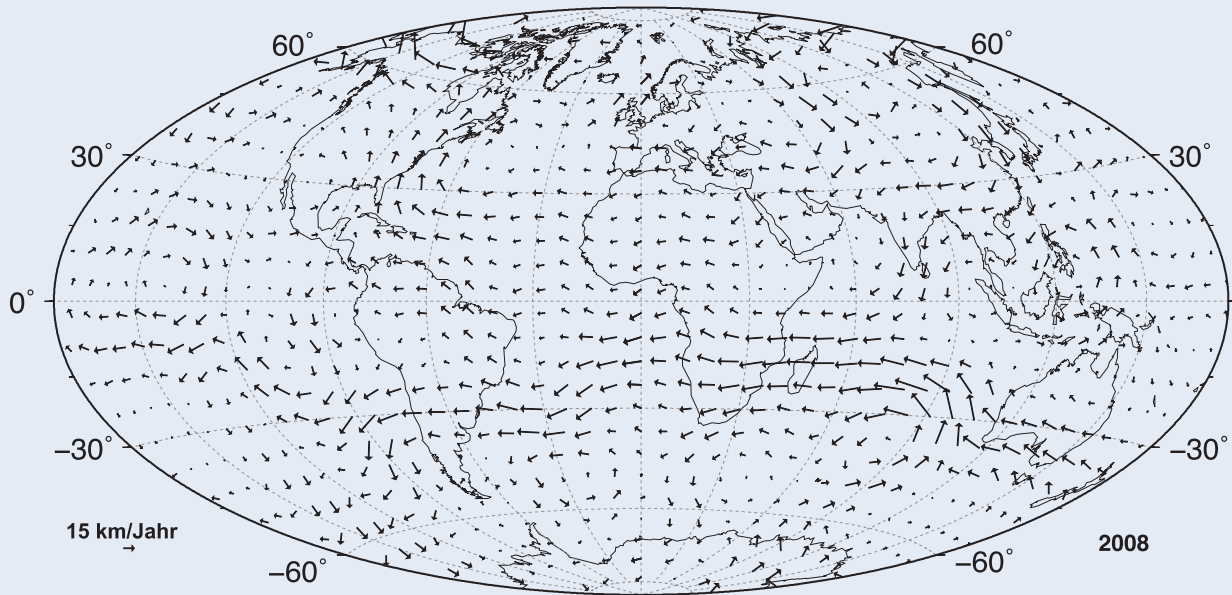


Abb. 4: Fluidbewegung an der Kernoberfläche. Man erkennt eine starke westwärts gerichtete Bewegung im Bereich zwischen Indischem Ozean und Südatlantik.

Fig. 4: Map of the core surface flow at the epoch 2008. The strongest motion occurs in the region under the Indian ocean and the South Atlantic.

der Navier-Stokes-Gleichung beschrieben, welche zusätzlich noch einen Term der Lorentz-Kraft enthält, um die magnetische Wechselwirkung im flüssigen Außenkern (Fluid) zu beschreiben. Ähnlich wie in der Meteorologie und der Klimamodellierung ist das Zusammenspiel dieser Kräfte hochgradig komplex. Es erfordert hohe Rechnerleistungen, um eine genaue Modellierung der Dynamik und deren Abhängigkeit von den magnetischen, elektrischen und stofflichen Eigenschaften des Kernmaterials zu erreichen.

Obwohl die Entwicklung des Systems chaotisch ist, wird die Dynamik im Außenkern durch die schnelle Rotation der Erde dominiert. Die Erdrotation impliziert die Dominanz der Corioliskraft. Hieraus ergibt sich eine Reihe von Vereinfachungen bei der Beschreibung der Dynamik. Eine mögliche Annahme geht von einem Kräftegleichgewicht zwischen Corioliskraft und Druckgradientkraft aus. Vergleichbar mit der Meteorologie bezeichnet man dies als geostrophische Annahme. Mit Hilfe dieser Annahme kann man nun anhand von Beobachtungen des Erdmagnetfelds an der Erdoberfläche Rückschlüsse auf die Fluidbewegung an der Kernoberfläche ziehen. Prinzipiell ist die beobachtete Änderung des Magnetfelds die Folge zweier Prozesse, Diffusion und Advektion. Bei der magnetischen Diffusion sickert die magnetische Energie durch die Erdkernoberfläche in den Erdmantel, bei der Advektion wird die Morphologie des Erdmagnetfelds an der Kern-Mantel-Grenze durch die Fluidbewegung verändert. Die Überlagerung beider Prozesse resultiert in einer zeitlichen Änderung des Erdmagnetfelds. Dabei sind die Zeitskalen der Prozesse unterschiedlich: Diffusionsprozesse agieren auf einer rund 300-fach län-

geren Zeitskala als die Advektion. Die magnetische Diffusion ist daher bei der Untersuchung der Prozesse im Aussenkern vernachlässigbar. Unter Verwendung der diffusionslosen Induktionsgleichung, bei der die Änderung des Magnetfelds durch die Advektion des Magnetfelds beschrieben wird, ergibt sich ein Modell der Fluidbewegung im äußeren Kern. In Abb. 4 ist die geostrophische Fluidbewegung dargestellt.

Zeitliche Änderungen in der Fluidbewegung wirken sich nicht nur als zeitliche Änderungen des Magnetfelds aus, auch andere Beobachtungsgrößen des Erdsystems zeigen Korrelationen zur Fluidbewegung. So variiert z. B. die Länge der Erdrotation. Diese Variation kann lunaren, ozeanischen und atmosphärischen Beiträgen zugeordnet werden. Nach dem Entfernen dieser Anteile, die zu einer Beschleunigung bzw. Abbremsung der Erdrotation führen, zeigt die restliche Variation eindeutige Zusammenhänge mit der Säkularvariation des Magnetfelds und den Änderungen der Fluidbewegung im Außenkern. Wardinski et al. (2008) konnten diesen Zusammenhang zwischen dem geomagnetischen Jerk von 2003 und einer Änderung der Erdrotation nachweisen. So fluktuieren einige zonale Komponenten der Fluidbewegung beim Auftreten des Jerks gleichzeitig mit einer Änderung in der Erdrotation. Die Ursache der geomagnetischen Jerks ist aber noch nicht restlos verstanden.

Eine gängige Modellvorstellung geht davon aus, dass sich das Fluid im äußeren Erdkern unter Einfluss der Erdrotation in einer zylindrischen Symmetrie entlang der Rotationsachse bewegt. Es bilden sich dabei mehrere konzentrische Zylinder im Außenkern mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung. Diese Symmetrie kennt man auch aus hydrodynamischen Experimenten.

Kleine Abweichungen von dieser Gleichgewichtsstellung der Zylinder parallel zur Rotationsachse führen zu einer entgegengesetzten Bewegungsrichtung in den Zylindern (Abb. 5). Ein Grund dafür könnte eine elektromagnetische Kopplung des äußersten Zylinders mit den untersten Schichten des Erdmantels sein. Diese führt zu einer Beschleunigung des äußeren Zylinders in deren Folge sich eine magnetische Rückholkraft aufbaut, die der Beschleunigung des Zylinders entgegenwirkt und seine Bewegung abbremst.

An einem bestimmten Punkt sind magnetische Rückholkraft und Kopplungskraft gleich, die Kopplung mit dem Erdmantel bricht zusammen und die magnetische Rückholkraft beschleunigt den Zylinder in Richtung der Ausgangsposition. Es kommt zu einem Überschwingen des Zylinders, dem eine erneute magnetische Rückholkraft (diesmal mit entgegengesetztem Vorzeichen) entgegenwirkt. Sind diese Schwingungen einmal angestoßen, setzen sie sich fort, die Bewegung erfolgt in zonaler Richtung (parallel zum Äquator). Man bezeichnet diese Schwingungen als torsionale Oszillationen, die auch ein Grund für geomagnetische Jerks sein können. Die theoretischen Vorhersagen der Schwingungsperioden betragen einige Jahrzehnte. Das ist aber zu lang, um das zeitliche Auftreten aller Jerks einheitlich zu erklären. Daher interpretieren neuere Ansätze diese Ereignisse als sogenannte Alfvén-Wellen – niederfrequente Welle in elektrisch leitenden Flüssigkeiten – im flüssigen Außenkern.

Eine aktuelle Studie, die sich auf die Auswertung hochpräziser Messungen des Erdschwerefelds mit dem Satelliten GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) stützt, weist darauf hin, dass geomagnetische Jerks mit Massenverlagerungen im Außenkern einhergehen (Mandea et al., 2012). Die Daten der vom GFZ geleiteten Satellitenmission GRACE zeigen im Bereich des äquatorialen Afrikas, des Indischen und des atlantischen Ozeans kurzzeitige Fluktuationen des Erdschwerefelds, die gleichzeitig mit den geomagnetischen Jerks auftreten. In diesem Bereich ist die Fluidbewegung an der Oberfläche des

Erdkerns am stärksten (Abb. 4). Es wird erwartet, dass die für das Jahr 2013 geplante Satellitenmission Swarm hierzu weitere wichtige Datensätze liefern wird.

## Ausblick

In Deutschland laufen an den Universitäten in Göttingen und Münster sowie am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau aufwendige Computersimulationen des Geodynamos. Die permanente Verbesserung dieser Modelle in Verbindung mit der wachsenden Anzahl geo- und paläomagnetischer Daten kann eine solide Grundlage für Vorhersagen von Magnetfeldänderungen über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren schaffen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert diese Arbeiten in dem für die Erforschung planetarer Magnetfelder eingerichteten Schwerpunktprogramm „Planetarer Magnetismus“ (Planet Mag, DFG-SPP 1488). Ein wesentlicher Aspekt dieses Programms ist die Schaffung von Synergien zwischen allen deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen, die sich mit dem Erdmagnetfeld beschäftigen. Das GFZ beteiligt sich unter anderem mit der Entwicklung von Ansätzen zur Vorhersage zukünftiger Magnetfeldvariationen. Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit die numerische Modellierung des Geodynamos und die Entwicklung globaler Modelle des Erdmagnetfelds basierend auf geomagnetischen Beobachtungen.

## Literatur

- Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R. (2011): Reconstructing the Holocene geomagnetic field. - *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 3-4, 497-505, 10.1016/j.epsl.2011.10.031.
- Lesur, V., Wardinski, I., Rother, M., Mandea, M. (2008): GRIMM: the GFZ Reference Internal Magnetic Model based on vector satellite and observatory data. - *Geophysical Journal International*, 173, 2, 382-394, 10.1111/j.1365-246X.2008.03724.x.
- Lesur, V., Wardinski, I., Hamoudi, M., Rother, M. (2010): The second generation of the GFZ Reference Internal Magnetic Model: GRIMM-2. - *Earth Planets and Space*, 62, 10, 765-773, 10.5047/eps.2010.07.007.
- Mandea, M., Panet, I., Lesur, V., de Viron, O., Diament, M., Le Moué, J.-L. (2012 online first): Recent Changes of the Earth's core derived from satellite observations of magnetic and gravity fields. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 10.1073/pnas.1207346109.
- Nowaczyk, N. R., Arz, H. W., Frank, U., Kind, J., Plessen, B. (2012): Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments. - *Earth and Planetary Science Letters*, 351-352, 54-69, 10.1016/j.epsl.2012.06.050.
- Olsen, N., Mandea, M. (2008): Rapidly changing flows in the Earth's core. - *Nature Geoscience*, 1, 6, 390-394, 10.1038/ngeo203.
- Wardinski, I., Holme, R., Asari, S., Mandea, M. (2008): The 2003 geomagnetic jerk and its relation to the core surface flows. - *Earth and Planetary Science Letters*, V 267, 468-481, 10.1016/j.epsl.2007.12.008.
- Wardinski, I., Lesur, V. (2012): An extended version of the C<sub>3</sub>FM geomagnetic field model: application of a continuous frozen-flux constraint. - *Geophysical Journal International*, 189, 3, 1409-1429, 10.1111/j.1365-246X.2012.05384.x.

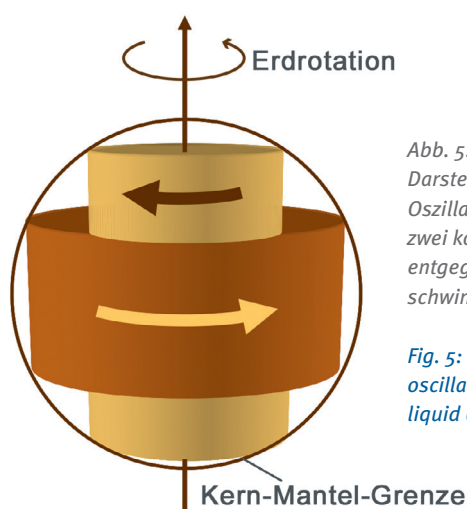


Abb. 5: Schematische Darstellung torsionaler Oszillationen, bei denen zwei koaxiale Zylinder in entgegengesetzter Richtung schwingen

Fig. 5: Sketch of torsional oscillations occurring in the liquid outer core