

# Magnetismus (1)

**DAUERMAGNETISMUS** Im Rahmen dieser neuen Beitragsreihe sollen die für Elektromaschinenbauer/innen und Elektroniker/innen für Maschinen und Antriebstechnik elementaren Grundlagen zum magnetischen Feld vorgestellt werden. Dabei geht es zunächst um Permanentmagnete, die ihr statisches Magnetfeld auch ohne ständige Energiezufuhr beibehalten und in späteren Folgen um Elektromagneten, die zur Aufrechterhaltung des Feldes einen elektrischen Stromfluss benötigen.

Peter Behrends,  
Redaktion »ema«

■ Bereits in der Antike beobachtete man, dass gewisse eisenhaltige Körper, Kräfte und Drehmomente auf ähnliche oder auch auf andere Eisenkörper ausüben. Diese Stoffe, die erstmalig in Kleinasien in der Gegend von Magnesia gefunden wurden, erhielten den Namen »Magnete«. Erste bekannte Aufzeichnungen über Magnetsteine machte der Naturphilosoph *Thales von Milet* um ca. 200 v. Chr.

## Wissenschaftler und deren Entdeckungen

Im Lauf der Jahrhunderte entdeckten viele bekannte Wissenschaftler magnetische Effekte. Ihren Namen findet man oftmals als Einheiten elektrischer oder auch magnetischer Größen:

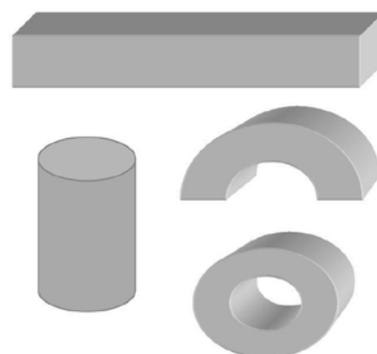
- In seinem Hauptwerk über die Magnete beschrieb der englische Arzt und Physiker *William Gilbert* (Kasten S.26) 1600 die Ähnlichkeit des Erdmagnetfeldes zu magnetischem Material und erklärt die Wirkungsweise des Kompasses. Dabei half die Darstellung der Erde als einen großen Magneten.
- Die Franzosen *Thomas Le Seur* und *Francis Jacquier* fanden um 1740 raus, dass die Kraft zwischen zwei Magneten im umgekehrten Verhältnis zu deren Abstand steht.
- Jahre später beschreiben *Jean-Baptiste Biot* and *Felix Savart* (Biot-Savart'sches Gesetz), dass sich auch die von einem stromdurchflossenen Leiter auf einen Magneten ausgeübten Kräfte mit  $r^{-1}$  verringern.
- Basierend auf den 1820 gemachten Beobachtungen von *Hans Christian Oersted*, dass sich Kompassnadeln senkrecht zu einem stromdurchflossenen Strom auslenken, zeigte *André Marie Ampère*, dass

auch stromdurchflossene Leiter Kräfte aufeinander ausüben.

- *Michael Faraday* brachte 1821 einen stromdurchflossenen Draht zur dauernden Rotation um einen Magneten und legte damit den Grundstein für den ersten Elektromotor. Zehn Jahre später entdeckte er die Induktion. Es entstand der Begriff »Magnetischer Fluss«. 1834 kam *Faraday* hinter den Transformatoreffekt und die Selbstinduktion.
- *Emil Lenz* formulierte 1834 die nach ihm benannte »Lenzsche Regel« zur Bestimmung der Richtung der induzierten Ströme. *Faraday* erkannte 1838 die Analogie von induzierter Elektrizität in Isolatoren und induziertem Magnetismus in magnetischen

Materialien. Erst Jahre danach publizierte er die Vermutung, dass Licht elektromagnetischen Ursprungs sei. Er beobachtete den Diamagnetismus durch Experimente mit Glas und Bismuth.

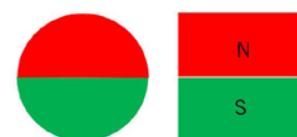
- *Wilhelm Weber* formulierte, dass Diamagnetismus omnipräsent ist und nur in Para- und Ferromagneten überdeckt wird.
- *William Thomson* (»Lord Kelvin«) führte 1850 die magnetische Permeabilität und Suszeptibilität ein. Dabei bestimmt die magnetische Permeabilität oder magnetische Leitfähigkeit die Durchlässigkeit (lat. »permeare« = durchdringen) von Materie für magnetische Felder und die Suszeptibilität die Reaktion von Materie auf äußere Felder.



axial magnetisiert

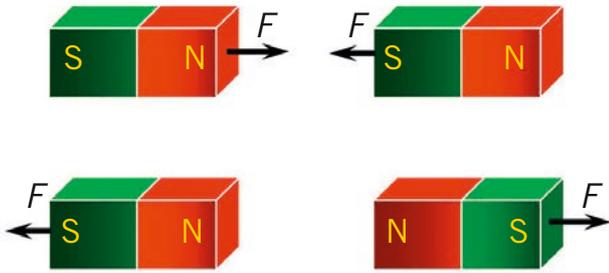


radial magnetisiert

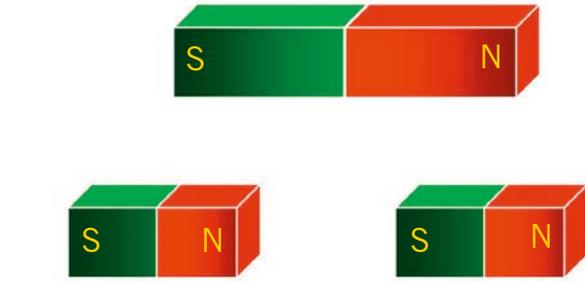


diametral magnetisiert

→ Bild 1: Beispiele für Dauermagnete: rechteck-, schalen-, stab- oder ringförmig – die Magnetisierungsrichtung erfolgt auf Kundenwunsch. Rechts im Bild sind verschiedene Magnetisierungsrichtungen dargestellt



→ Bild 2: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an



→ Bild 3: Bei Zerlegung eines Magneten in zwei Teile entstehen zwei neue und vollständige Magnete

• Der schottische Physiker *James Clerk Maxwell* vervollständigt 1864 seine Abhandlung über die gemeinsame Beschreibung der Elektrizität und des Magnetismus (Maxwellgleichungen). Sie gehören zu den wichtigsten Leistungen der Physik und Mathematik des 19. Jahrhunderts.

### Magnetwerkstoffe

Heute kommen in allen technischen Fachrichtungen Magnete in mannigfachen Formen (Bild 1) und mit ganz unterschiedlichen Intensitäten zum Einsatz. In den letzten Jahrzehnten erzielte man bei der Herstellung sehr große Fortschritte, indem man Legierungen mit bestimmten Elementen, den sog. »seltene Erden«, verwendet. Dadurch lassen sich besonders starke Dauermagnete herstellen. Samarium-Kobalt (SmCo) beispielsweise ist eine Legierung des Seltenerdmetalls Samarium (Sm) mit dem Metall Kobalt (Co) und wird vorrangig als SmCo5 oder Sm2Co17 in Permanentmagneten verwendet.

Seit Mitte der 1980er Jahre sind Neodym- oder NdFeB-Magnete im Einsatz. Sie bestehen hauptsächlich aus einer intermetallischen Verbindung des Seltene-Erde-Elements Neodym (Nd) sowie Eisen (Fe), das teilweise durch Kobalt (Co) ersetzt sein kann. Das Halbmetall Bor (B) bestimmt maßgeblich die Kristallstruktur der Magnete. Da Neodym-Magnete leider stark korrosionsanfällig sind, beschichtet man deren Oberflächen z. B. mit Nickel, Zink oder Zinn. Die relativ geringe Curie-Temperatur beschränkt den Einsatzbereich auf ca. 200 °C. Obwohl die Ursache magnetischer Wechselbeziehungen noch nicht zu hundert Prozent geklärt ist, sind die Zusammenhänge gründlich untersucht und lassen sich einfach berechnen. Man kann folgendes feststellen:

• In der Umgebung von Magneten treten Kräfte auf andere Magnete und ferromagnetische Materialien auf. Diese Kräfte nehmen mit zunehmendem Abstand ab.

• Die Wirkungen sind nicht an ein bestimmtes Medium gebunden, sie treten auch im Vakuum auf.

• Außer bei Eisen entstehen diese Kräfte noch bei Nickel, Kobalt und Legierungen aus diesen und mit anderen Stoffen.

• Der Raum, in dem diese Wirkungen erkennbar sind, wird Magnetfeld genannt. Bringt man ein unmagnetisches Eisenstück in ein Magnetfeld, so wird es selbst zu einem Magneten. Diesen Vorgang bezeichnet man mit »Magnetisierung«.

• Die Kraftwirkung bzw. Feldliniendichte oder Feldlinienkonzentration eines Magneten ist an zwei Stellen am größten. Diese Stellen bezeichnet man als Pole. Jeder Dauermagnet hat zwei unterschiedliche Pole. Sie treten immer paarweise auf.

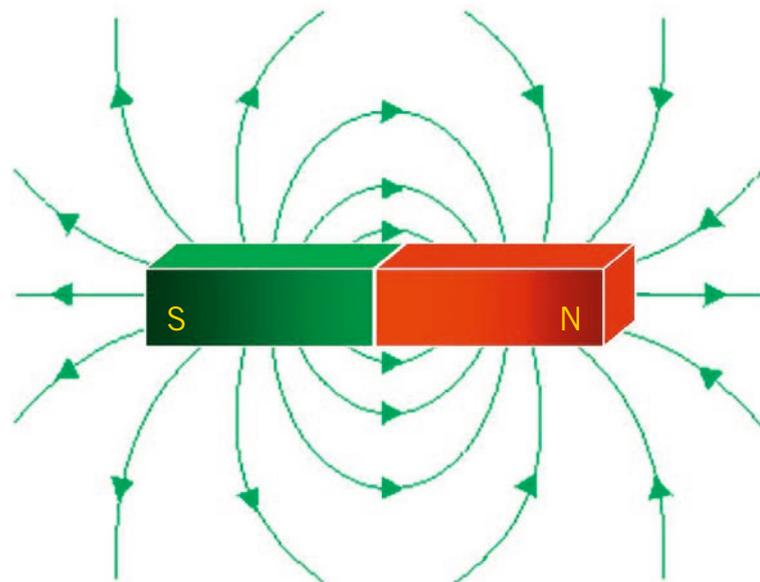
Nimmt man eine frei bewegliche Magnetnadel, wie sie z. B. im Kompass enthalten ist, so stellt man fest, dass sie sich so ausrichtet, dass die eine Spitze nach Norden und die an-

dere nach Süden zeigt. Deshalb spricht man bei einem Magneten vom Nord- bzw. Südpol.

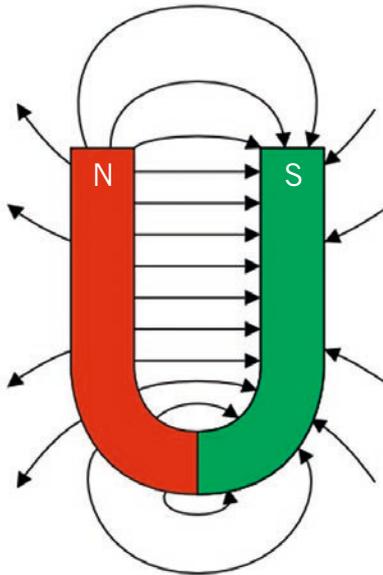
### Grundlegendes zum Magnetismus

Dass jeder Dauermagnet zwei entgegengesetzte (man sagt auch ungleichnamige) Pole hat, folgt aus einem Experiment, bei dem man die Kräfte untersucht, die zwei Dauermagnete aufeinander ausüben (Bild 2). Aus praktischen Gründen sind die Pole von Versuchsmagneten meist farbig markiert. Rot kennzeichnet einen Nordpol, Grün einen Südpol. Aus den Beobachtungen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

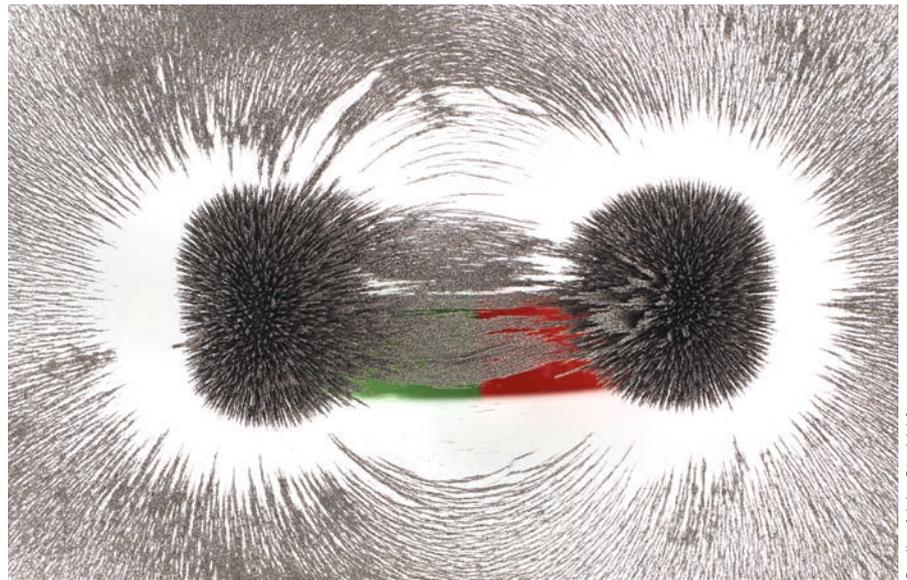
- Gleichartige (= gleichnamige) Magnetpole stoßen sich ab, ungleichartige (= ungleichnamige) Magnetpole ziehen sich an.
- Magnetisiert man einen länglichen, dünnen Eisenstab in Längsrichtung, so wird dieser, wie bereits erwähnt, selbst zu einem Magneten. Teilt man anschließend



→ Bild 4: Feldlinien eines Stabmagneten. Das Magnetfeld breitet sich in alle Richtungen um den Stab herum aus. Es ist also nicht nur zwei- sondern dreidimensional um den Stabmagneten vorhanden



→ Bild 5: Magnetfeld eines Hufeisenmagneten



→ Bild 6: Eisenfeilspäne visualisieren das Feld eines Stabmagneten

Quelle: Adobe Stock/akt

diesen Stab in viele kleine Einzelstäbe, so erhält man wiederum kleine Magnete (Bild 3). Es ist nicht möglich, durch Teilung einzelne Pole herzustellen.

- Magnetpole treten immer paarweise auf, d. h., sie bestehen aus Nord- und Südpol.
- Ebenso wie ein elektrisches Feld oder auch ein Gravitationsfeld lässt sich ein Magnetfeld durch Feldlinien veranschaulichen. Die Tangente an der Feldlinie in einem bestimmten Punkt gibt die Richtung des magnetischen Feldes genau in diesem Punkt an. Durch eine kleine, drehbar gelagerte Magnetnadel lässt sich ein Magnetfeld bezüglich der Richtung ausmessen. Sie richtet sich genau in Feldrichtung aus. Bild 4 zeigt das Feldlinienbild eines Stabmagneten. Da die Richtung des Magnetfeldes mit der Richtung der Kraft auf ein kleines Eisenteil übereinstimmt, werden Feldlinien auch als Kraftlinien bezeichnet. Zu beachten ist jedoch, dass die Kraft, die

entlang einer Feldlinie wirkt, im Allgemeinen variiert, also nicht konstant ist.

- Da es keine magnetischen Monopole gibt (Monopole = Pole, die nicht paarweise, sondern einzeln vorkommen), sind magnetische Feldlinien immer geschlossen. Sie haben keinen Anfang und kein Ende (in Bild 4 schließen sich die Feldlinien im Inneren des Stabmagneten). Bei elektrischen Feldern ist dies anders. Hier gibt es sowohl positive als auch negative Ladungen, die einzeln auftreten können und somit Anfang oder Ende einer Feldlinie sein können.
- Der Verlauf des magnetischen Feldes, d. h. der Feldlinienverlauf, lässt sich heute exakt berechnen (Bild 5). Unter Umständen sind hierfür allerdings umfangreiche numerische Feldrechenprogramme erforderlich. Heutzutage kommen verschiedenste Feldrechenprogramme zur Lösung dreidimensionaler elektromagnetischer Aufgabenstellungen zum Einsatz. Die bekann-

testen Vertreter sind die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Momentenmethode (MoM), die Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (FDTD), die Finite-Integral-Methode (FIT) und die Transmission-Line-Matrix-Methode (TLM). Mit allen genannten Verfahren wurde bereits eine große Vielfalt elektromagnetischer Problemstellungen behandelt und erfolgreich gelöst.

Durch spezielle Sonden, z. B. Hall-Sonden, lässt sich das Magnetfeld auch messtechnisch erfassen. Früher hat man gelegentlich Eisenfeilspäne auf ein Blatt Papier gestreut und dieses etwas geschüttelt. Die winzigen Eisenteilchen werden magnetisiert und ordnen sich dadurch in Richtung der Feldlinien aus, so dass der Verlauf des Feldes erkennbar wird (Bild 6). Außer für pädagogische Zwecke hat diese Vorgehensweise heute keine praktische Bedeutung mehr. Feldlinien sind in Wirklichkeit nicht vorhanden. Es handelt sich hierbei lediglich um eine Möglichkeit, um sich den Verlauf des Feldes deutlich zu machen.

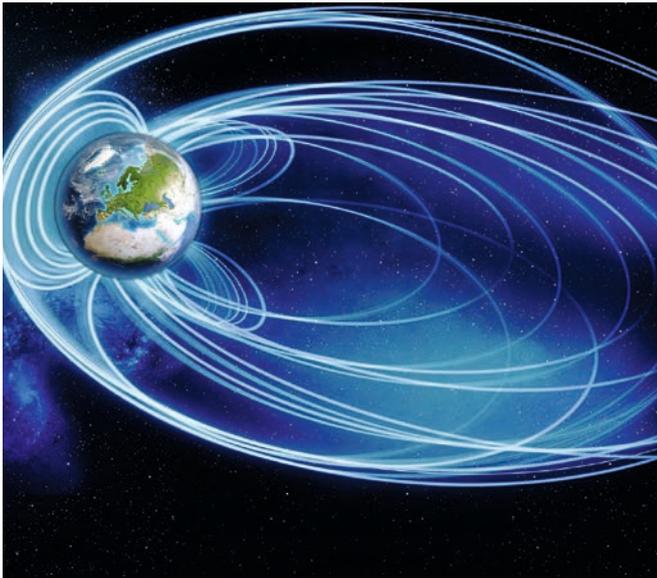
## Wer war William Gilbert?

*William Gilbert* (\* 24. Mai 1544 in Essex, England; † 10. Dezember 1603 in London oder Colchester) war ein englischer Arzt und als Physiker einer der Pioniere der modernen naturwissenschaftlichen Forschung. Mit sorgfältig geplanten Experimenten erforschte er systematisch die Eigenschaften magnetischer Erze, untersuchte die elektrische Aufladung an unterschiedlichen Substanzen und unterschied als erster eindeutig zwischen Magnetismus und statischer Elektrizität. Er vertrat die Ansicht, dass der Erdmagnetismus direkt mit der Drehbewegung der Erde zusammenhängen würde und die Planeten von einer Art magnetischer Kraft auf ihren Bahnen gehalten würden und dass die Erde insgesamt als ein einziger Magnet mit zwei Polen angesehen werden müsse. Das erste Buch über den Magnetismus, d. h. die Lehre über das Wesen der Magnete, erschien im Jahre 1600 in London. Es hatte den Titel »Über den Magneten, die magnetischen Kräfte und den großen Magneten Erde«. Zeitgenossen *Gilberts* wie *Johannes Kepler* und *Galileo Galilei* schätzten seine Leistung als Physiker hoch ein.

## Entstehung des Erdmagnetfelds

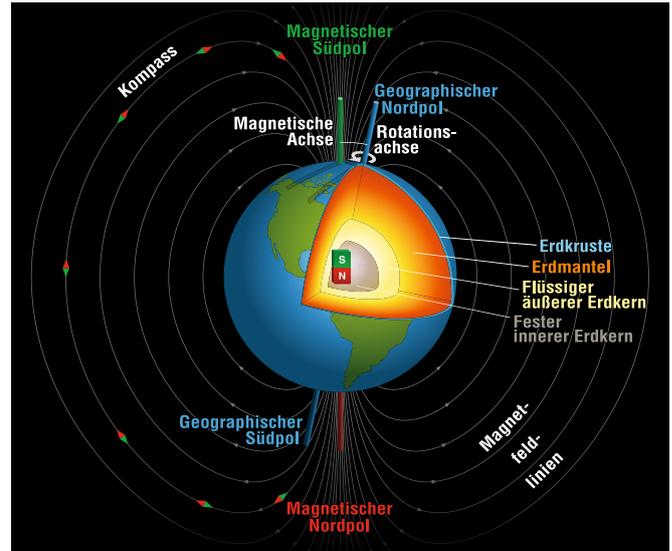
Das Magnetfeld der Erde (Bild 7) entsteht dadurch, dass Materie – im Wesentlichen flüssige Metalle – im Erdinneren unter dem Einfluss physikalischer Kräfte schraubenförmige Bewegungen ausführt. Unter bestimmten Bedingungen entsteht dabei ein sich selbst erhaltendes Magnetfeld, der so genannte Geodynamo.

Das Magnetfeld der Erde aber ist nicht stabil. Es ändert unaufhörlich seine Stärke und seine Lage und hat sich im Laufe der Erdgeschichte mehrmals umgepolzt, also Nordpol



Quelle: Adobe Stock/ brand.punkt

→ Bild 7: Das Erdmagnetfeld



Quelle: Adobe Stock/Peter Hermes Furian

→ Bild 8: Das Magnetfeld der Erde schützt vor kosmischer Strahlung und machte Leben auf der Erde erst möglich

und Südpol vertauscht. Der Erde bietet das Magnetfeld einen unsichtbaren Schutz vor energiereichen, geladenen Teilchen, der sogenannten kosmischen Strahlung und dem Sonnenwind, indem es die geladenen Teilchen um die Erde herumlenkt (Bild 8). Gelangen trotzdem geladene Teilchen aus dem Weltall in die Erdatmosphäre, entstehen die bekannten Polarlichter. Dank des Erdmagnetfeldes ist Leben auf der Erde erst möglich. Generationen von Seefahrern und Fernreisenden bot das Magnetfeld außerdem eine wichtige Orientierungshilfe. Manche Tierarten können sich am Erdmagnetfeld orientieren. Menschen können mit ihren Sinnesorganen Magnetfelder nicht wahrnehmen.

Für einen Permanentmagneten ist es im Erdinnern zu heiß. Damit kommen als Ursachen für das Magnetfeld vor allem großräumige Strömungen eines elektrisch leitfähigen Mediums im Innern der Erde in Frage. Diese Flüssigkeitsbewegungen, die durch Temperaturunterschiede im Erdinnern sowie durch die Rotation der Erde angetrieben werden, können aus kleinen Instabilitäten ein sich selbst stabilisierendes Magnetfeld aufbauen. Für diese allgemein akzeptierte Theorie fehlte jedoch lange Zeit der experimentelle Beweis.

Bereits vor mehreren Jahren gelang es durch eine Simulation des Erdmagnetfeldes am Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft diese Theorie zu bestätigen (Inge Arnold, Stabsabteilung Presse, Kommunikation und Marketing). Mit einem aufwendigen Experiment ließ sich nachweisen, dass der Geodynamo wirklich funktioniert. Dazu wurde flüssiges Natrium in einem Versuchsaufbau auf Bahnen gezwungen, die

den vermuteten Bewegungen im flüssigen Erdkern entsprechen. Tatsächlich zeigten die Messinstrumente nach kurzer Zeit ein stabiles Magnetfeld. Während des ersten Versuchs änderte das Magnetfeld in einem Zeitraum von zehn Minuten seine Lage innerhalb der Versuchsanordnung nur leicht. Damit gelang es weltweit zum ersten Mal, das Erdmagnetfeld im Labor zu simulieren.

#### Wissenschaftlicher Hintergrund

Im Innern der Erde bilden sich zwischen dem heißen Kern und der kühleren Kruste Konvektionsströmungen aus. Heißes Material steigt nach oben, kühleres Material sinkt nach unten; es entstehen walzenförmige Strömungen, die von der Schwerkraft der Erde angetrieben werden.

Eine weitere wichtige Kraft kommt durch die Drehbewegung der gesamten Erde zustande: die Corioliskraft, die auch die Wirbel in der Atmosphäre erzeugt. Unter dem Einfluss der Corioliskraft bildet die Konvektionsströmung schraubenförmige Strömungsmuster parallel zur Erdachse aus. Diese Konvektionsströmungen können sich in einem Laborexperiment nicht von alleine ausbilden; sie werden simuliert, indem flüssiges Natrium durch eine entsprechende Versuchsgeometrie gepumpt wird.

In der Magnetohydrodynamik, der Theorie strömender leitender Medien in magnetischen Feldern, kann gezeigt werden, dass in solchen Strömungen kleinste magnetische Felder, wie sie durch Instabilitäten hervorgerufen werden, sich selbst verstärken können. Die physikalische Ursache ist der so genannte  $\alpha$ -Effekt: Durch Streckung und Verwindung

magnetischer Feldlinien in Strömungsfeldern entstehen zusätzliche elektrische Ströme und daraus wieder neue magnetische Felder, die die ursprünglichen verstärken.

Wegen der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes strahlt die Erde elektromagnetische Strahlung ab. Würde nicht ständig Energie nachgeliefert, wäre das Magnetfeld in einigen zehntausend Jahren verschwunden. Aus geologischen Messungen weiß man heute, dass das Magnetfeld schon mindestens 3,6 Milliarden Jahre alt ist.

Die zu seinem Erhalt erforderliche Energie stammt aus großräumigen Strömungen im Erdinnern. Mechanische Energie wird dabei in elektromagnetische Energie umgewandelt; dies ist die Wirkungsweise eines Dynamos. Ein Fahrraddynamo stellt Energie für die Beleuchtung zur Verfügung. Der Geodynamo stellt die Energie für das Aufrechterhalten des Magnetfeldes bereit. Anders als in technischen Dynamos geschieht dies hier in einer homogenen Flüssigkeit. Der Geodynamo ist deswegen ein so genannter homogener Dynamo.

Die entscheidende physikalische Größe, die bestimmt, ob in einer Strömung ein Dynamoefekt möglich ist oder nicht, ist die magnetische **Reynoldszahl**. Sie hängt ab von der räumlichen Ausdehnung des Experiments, von den magnetischen und elektrischen Eigenschaften des strömenden Materials und von dessen Strömungsgeschwindigkeit. Im Innern der Erde sind diese Faktoren nach derzeitigem Erkenntnisstand genügend groß. Deshalb kann man ein solches Experiment nur in einer relativ ausgedehnten Versuchseinrichtung durchführen.

(Fortsetzung folgt)