

## **Merkurs Magnetfeld erklärt?**

Die meisten Planeten unseres Sonnensystems haben ein eigenes Magnetfeld. Nur Mars und Venus bilden eine Ausnahme, wobei die Magnetisierung der Marskruste zeigt, dass dieser Planeten in seiner Frühzeit ein starkes Magnetfeld besaß. Magnetfelder schirmen die Planeten von den energiereichen Partikeln des Sonnenwindes ab. Diese können bei ungehindertem Auftreffen eine vorhandene Atmosphäre erodieren, wie es beim Mars nachgewiesen wurde. Die Stärke und die Struktur der planetaren Magnetfelder unterscheiden sich von dem der Erde. In den meisten Fällen hat das Magnetfeld eine Dipolstruktur, wie bei einem Stabmagneten. Oft ist der Dipol nahezu parallel zur Rotationsachse des Planeten ausgerichtet. Die Struktur der Magnetfelder der äußeren Planeten Uranus und Neptun ist jedoch komplexer; der Dipol ist weit gegen die Polachse geneigt und nicht stärker als die Beiträge des Quadrupols oder Oktupols (mit vier bzw. acht Magnetpolen). Verglichen mit dem der Erde ist Jupiters Magnetfeld an der Planetenoberfläche zehnmal stärker, während Merkurs Feld einhundert Mal schwächer ist. Eine Theorie des planetaren Magnetismus muss diese Unterschiede plausibel erklären können. Hieran arbeitet eine Gruppe am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau unter Leitung von Prof. Ulrich Christensen.

Die Entstehung der Magnetfelder wird durch einen Dynamoprozess im flüssigen Kern des Planeten erklärt. Thermische und chemische Konvektion setzt die elektrisch leitende Flüssigkeit in Bewegung. Durch elektromagnetische Induktion in einem vorhandenen Magnetfeld werden elektrische Ströme erzeugt, welche dieses Magnetfeld dann aufrechterhalten. Auf der Dynamotheorie basierende Computermodelle können die Stärke und Struktur des irdischen Magnetfeldes gut erklären. Die geringe Stärke des Merkurfeldes bereitet aber Kopfzerbrechen. Nach der gängigen Theorie sollte sich die Magnetfeldstärke innerhalb der Dynamoregion so einstellen, dass die auf die Strömung wirkenden elektromagnetischen Kräfte dieselbe Stärke haben wie die Corioliskraft, welche durch die Eigenrotation des Planeten entsteht. Da Merkur mit einer Umdrehung in 59 Tagen recht langsam rotiert, erwartet man, dass sein Magnetfeld schwächer ist als das der Erde. Andererseits nimmt sein Eisenkern 75% des Planetendurchmessers ein (siehe Abbildung), ist also relativ gesehen deutlich größer als im Fall der Erde (55%), so dass die Abnahme der

Magnetfeldstärke vom Rand des Kerns bis zur Oberfläche geringer ist. Man würde eine mittlere Feldstärke an der Merkuroberfläche von 15.000 Nanotesla (nT) erwarten, beobachtet wurden aber nur 450 nT (bei der Erde sind es 50.000 nT). Diese Diskrepanz führte zu Zweifeln daran, ob das Merkurfeld wirklich durch einen Dynamo erzeugt wird. Von seiner Stärke her könnte es auch auf der Magnetisierung kleiner Mengen ferromagnetischer Mineralien in der Kruste des Planeten beruhen. An der Marsoberfläche entstehen auf diese Weise lokal begrenzte Magnetfelder von bis zu einigen 1.000 nT.

Bisher wurde Merkurs Magnetfeld nur bei zwei Vorbeiflügen der Raumsonde Mariner 10 in den Jahren 1974 und 1975 beobachtet. Die Messdaten lassen sich durch einen Dipol, der um  $14^\circ$  gegen die Rotationsachse geneigt ist, gut erklären (bei der Erde beträgt die Neigung derzeit  $11^\circ$ ). Die Datenbasis ist aber zu dünn, um die Struktur des Merkurfeldes eindeutig zu bestimmen. Beispielsweise könnte neben dem Dipol auch ein signifikanter Quadrupolanteil vorhanden sein. Die Beobachtungen durch Mariner 10 machten jedoch deutlich, dass das Merkurfeld globaler Natur ist und sich damit von den kleinräumigen und lokalen Magnetfeldstrukturen an der Marsoberfläche unterscheidet. Dies lässt eine Entstehung durch Magnetisierung in der Kruste, die örtlich sehr variabel sein sollte, als wenig wahrscheinlich erscheinen. Die Erzeugung durch einen Dynamo ist die plausibelste Alternative; aber wie lässt sich die geringe beobachtete Feldstärke mit der Dynamotheorie vereinbaren? Das Dilemma wäre gelöst, wenn Merkur ein starkes Magnetfeld innerhalb der Dynamoregion hätte, aber nur ein geringer Bruchteil des Feldes aus seinem Eisenkern nach außen dringen könnte.

Peter Olson (Johns Hopkins Universität in Baltimore) und Ulrich Christensen haben die Ergebnisse zahlreicher numerischer Dynamomodelle ausgewertet und die gefunden Gesetzmäßigkeiten auf die verschiedenen Planeten angewandt. Dabei stießen sie auf ein weiteres Problem. Die langsame Rotation des Merkur sollte dazu führen, dass der Dipol und Quadrupol deutlich schwächer als „höhere Multipole“ zum Magnetfeld beitragen, was nicht gut zu den Beobachtungen passt.

Merkur ist, nach der Degradierung Plutos, der kleinste Planet im Sonnensystem. Deshalb kühlen seine äußeren Bereiche rascher aus als bei der Erde. Evolutionsmodelle legen aber nahe, dass sein innerer Teil noch heiß und ein Teil des Eisenkerns nach wie vor flüssig ist. Das Fehlen von Plattentektonik reduziert die Wärmeabgabe aus dem Inneren. Die Modelle sagen einen relativ geringeren

Wärmefluss innerhalb des Kerns voraus. Da Eisen die Wärme gut leitet, reichen kleine Temperaturunterschiede zum Wärmetransport aus. Die Temperaturzunahme mit der Tiefe ist im Kern geringer als der so genannte adiabatische Temperaturgradient, welcher überschritten werden muss, damit Konvektion einsetzt. Eine ähnliche Situation haben wir manchmal in der Erdatmosphäre: bei zu geringer Temperaturabnahme mit der Höhe ist die Atmosphäre stabil geschichtet und es gibt keinen vertikalen Austausch. Auch der Merkurkern sollte thermisch stabil geschichtet sein, zumindest in seinen äußeren Bereichen. Es gibt also bei Merkur ein weiteres Problem für die Dynamotheorie.

Damit überhaupt ein Dynamo angetrieben werden kann, ist die Existenz eines festen inneren Kerns, den es auch in der Erde gibt, entscheidend. Während der Planet abkühlt, wächst der innere Kern langsam, indem Eisen an seinem Außenrand gefriert. Der flüssige äußere Kern besteht nicht aus reinem Eisen, sondern ihm sind einige Prozent eines leichten chemischen Elements beigemischt – im Fall des Merkurs wahrscheinlich Schwefel. Der Schwefel wird nur in geringem Umfang in die feste Phase mit aufgenommen. Er reichert sich also in der Flüssigkeitsschicht direkt über dem inneren Kern an und verleiht ihr Auftrieb. In den tiefen Teilen des flüssigen Merkurkerns dominiert der Einfluss der Konzentrationsunterschiede auf die Dichte und treibt eine chemische Konvektionsströmung an. Im äußeren Teil des Kerns dominiert die stabile Temperaturschichtung und unterbindet aktive Konvektion. Ein Dynamo würde demnach nur in den tiefen Teilen von Merkurs flüssigem Kern arbeiten können, im Gegensatz zum Dynamo der Erde, deren Kern wahrscheinlich insgesamt konvektiert.

In Computermodellen hat Ulrich Christensen die Eigenschaften eines Dynamos in einem teilweise stabil geschichteten Merkurkern untersucht. Die Konvektionsströmung ist auf die unteren 40% des flüssigen Kerns beschränkt. Die Simulationen zeigen, dass dort tatsächlich ein starkes Magnetfeld erzeugt wird. Der Dipol und der Quadrupol leisten nur einen untergeordneten Beitrag zum inneren Magnetfeld, welches von höheren Multipolen mit einer komplexen und kleinräumigen Struktur dominiert wird. Ein entscheidender Unterschied ist aber, dass die letzteren Feldanteile in Zeiträumen von einigen hundert Jahren schwanken, während der Dipol sich nur auf Zeitskalen von 10.000 Jahren stark verändert. Wie beim Skin-Effekt in der Hochfrequenztechnik, bei dem schnell wechselnde elektrische Ströme und Magnetfelder kaum in das Innere eines elektrischen Leiters eindringen können,

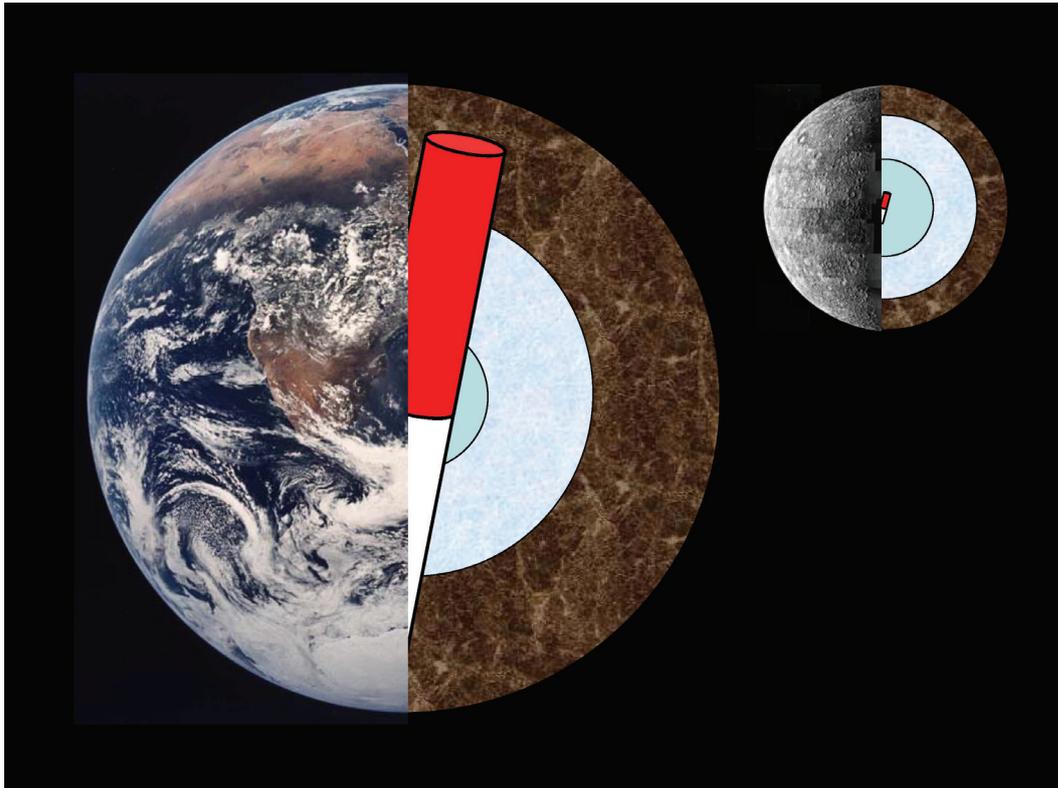
gelangt nur ein Bruchteil des Dynamofeldes durch den äußeren ruhenden Teil des Eisenkerns nach außen. Dabei werden die schnell wechselnden Multipolanteile fast völlig weggedämpft, während die langsam variierenden Dipol- und Quadrupolanteile unter Abschwächung nach außen dringen können. In zwei untersuchten Modellen wird die Magnetfeldstruktur an der Planetenoberfläche von diesen beiden Komponenten dominiert, im Einklang mit den Mariner-10-Beobachtungen. Die Feldstärke beträgt in einem der Modelle 20% und im anderen 200% des beobachteten Wertes. Ein in seinen Eigenschaften dazwischen liegendes Modell kann nach vorläufigen Ergebnissen die beobachtete Feldstärke reproduzieren.

Derzeit ist der MESSENGER-Raumsonde der NASA auf dem Weg zum Merkur und die ESA bereitet zusammen mit der japanischen Raumfahrtagentur JAXA die Bepi Colombo Mission vor, bei der zwei Sonden in eine Umlaufbahn um Merkur einschwenken sollen. Diese Missionen werden Merkurs Magnetfeld viel besser charakterisieren als es Mariner 10 konnte. Damit können die Vorhersagen des neuen Dynamomodells überprüft werden: das Magnetfeld sollte vom Dipol und gegebenenfalls Quadrupol dominiert werden, sich ungefähr an der Polachse ausrichten, und sollte sich auf Zeitskalen von Jahrzehnten nicht merklich verändern (bei der Erde beobachtet man solche Änderungen, die Säkularvariationen genannt werden). Eine Voraussetzung für das Funktionieren des Modells ist, dass der feste innere Kern nicht sehr groß sein darf, wie es teilweise vermutet wird. In diesem Fall wäre oberhalb der Dynamoregion nicht genug Platz für eine stabile Flüssigkeitsschicht vorhanden, die entscheidend für das vorgeschlagene Modell ist. Die Größe des inneren Kerns lässt sich möglicherweise mit Hilfe von geodätischen Beobachtungen des Merkurs abschätzen. Diese sollen unter anderem mit einem Laser-Altimeter durchgeführt werden, an dessen Bau das Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung beteiligt ist. Sollten die neuen Beobachtungen das vorgelegte Modell bestätigen, dann dürften letzte Zweifel an der allgemeinen Gültigkeit der Dynamotheorie zur Erzeugung planetarer Magnetfelder ausgeräumt sein.

### Veröffentlichungen:

Christensen, U.R., A deep dynamo generating Mercury's magnetic field. *Nature*, 21.12.2006.

Olson, P., Christensen, U.R., Dipole moment scaling for convection-driven planetary dynamos. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **250**, 561-571, 2006.



**Abbildung:** Maßstäblicher Vergleich von Erde und Merkur mit den Proportionen von Eisenkern und Silikatmantel. Die Größe des festen inneren Kerns ist beim Merkur sehr unsicher. Würde das außerhalb der Planeten gemessene Dipolfeld durch (fiktive) Stabmagneten im Inneren erzeugt, so wäre deren Größenverhältnis so wie hier dargestellt ist.

*Weitere Auskünfte: Prof. Ulrich Christensen, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Max-Planck-Strasse 2, 37191 Katlenburg-Lindau, Tel.: 05556-979-542, Fax: -219, Email: christensen@mps.mpg.de*