

## Merkurs ungewöhnliches Magnetfeld

### Theoretische und numerische Untersuchung des planetaren Dynamos auf Merkur im Rahmen des BepiColombo-Projekts

*D. Heyner, K.-H. Glaßmeier, P. Kolhey, Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik, Technische Universität Braunschweig*

#### Kurzgefasst

- Merkurs Magnetfeld
- BepiColombo-Mission
- Simulationen des Dynamoprozess mit MagIC

Im Oktober 2018 startete die erste europäisch-japanische Raumfahrtmission namens BepiColombo zum Planeten Merkur. Ziel dieser Mission ist es, ein besseres Verständnis über die Eigenschaften des sonnennächsten Planeten zu bekommen. Eine Besonderheit dabei ist, dass gleichzeitig zwei Orbiter den Planeten untersuchen werden. Zum einen ist das der europäische Orbiter MPO, welcher nah am Merkur genaueres über seine Oberfläche und interne Zusammensetzung herausfinden soll und zum anderen der japanische Orbiter MIO (vorher MMO), welcher in einer höheren Umlaufbahn die Magnetosphäre untersuchen wird. Vom besonderen Interesse wird dabei sein, das Magnetfeld des Planeten zu untersuchen. Ein globales Magnetfeld internen Ursprungs wurde dabei erst im Rahmen der ersten Flybys der Mariner 10 Mission im Jahre 1974 entdeckt und somit bestätigt, dass ein aktiver Dynamoprozess im Kern vorhanden ist [1]. Zuvor gab es die wissenschaftliche Meinung, dass durch die Größe des Planeten der eiserne Kern komplett ausgefroren sei und konvektive Strömungen im Kern, die den Dynamoprozess antreiben, nicht existieren. Dennoch, der vorherrschende Dynamo stellt die Wissenschaftler vor eine Herausforderung, wie die MESSENGER Mission der NASA einige Jahrzehnte später bestätigte [2,3]. Denn verglichen mit der Erde zeigt das generierte Magnetfeld an der Oberfläche des Merkurs nur ca. 1% der Feldstärke auf [3]. Dies widerspricht den Ergebnissen aus herkömmlichen Dynamomodellen, welche für die Erde berechnet wurden. Auch die nahezu perfekte Achsensymmetrie des Feldes widerspricht dem Cowling-Theorem, welches besagt, dass ein achsensymmetrisches Magnetfeld nicht von einem selbst-erhaltenen Dynamo aufrechterhalten werden kann. Des Weiteren weist das Dipolfeld eine Verschiebung des magnetischen Äquators in Richtung Norden auf, die auf einen relativ großen Einfluss des magnetischen Quadrupols hindeutet. Dies führte dazu, dass neue Modelle zum Aufbau des

Planeteninneren zur Erklärung des Dynamos veröffentlicht wurden [4–11]. Auch wenn diese Modelle wesentliche Charakteristiken des Magnetfelds auf Merkur widerspiegeln, gibt es weiterhin viele Unsicherheiten. Dies betrifft insbesondere die Größe des inneren Kerns, welcher einen erheblichen Einfluss auf die Dynamik des flüssigen äußeren Kerns haben kann [8]. Somit können weitere numerische Simulationen des Dynamoprozess bereits existierende Modelle stützen und möglicherweise neue Erkenntnisse über die Entstehung des Magnetfelds auf Merkur bringen. In Zukunft werden ebenfalls neue Daten durch die BepiColombo-Mission einen besseren Einblick geben und uns damit der Lösung um das Rätsel des außergewöhnlichen Magnetfelds auf Merkur ein Stück näher bringen.

Für die numerischen Simulationen wird der Programmcode **MagIC** verwendet [12]. Der Code löst die grundlegenden magnetohydrodynamischen Gleichungen in sphärischer Geometrie über eine pseudo-spektrale Methode. Abbildung 1 zeigt eine Skizze der Modellgeometrie, welche für die numerischen Simulationen verwendet wird. **MagIC** ist über MPI und OpenMP parallelisiert, wodurch der Code für eine Anwendung auf Hochleistungsrechnern optimiert ist.

Eine Beispielsimulation nach einem neueren Modell ist in Abbildung zu sehen 2. Die Abbildung zeigt eine Momentaufnahme des radialen Magnetfelds (Abbildung 2 (a)) an der Kern-Mantel-Grenze. Hier ist zu erkennen, dass das Modell die wesentliche Struktur des Merkurmagnetfelds reproduzieren kann. Es ist ein stark achsensymmetrischer Dipol, dessen magnetischer Äquator nach Norden verschoben ist. Außerdem ist die Feldstärke recht schwach. In Abbildung 2(b) zeigt sich, dass die Simulation die Dipol- und Quadrupolkomponente des Magnetfelds ( $\ell = 1$  und  $\ell = 2$ ) im Vergleich zu den Feldmodellen sehr gut reproduzieren kann.

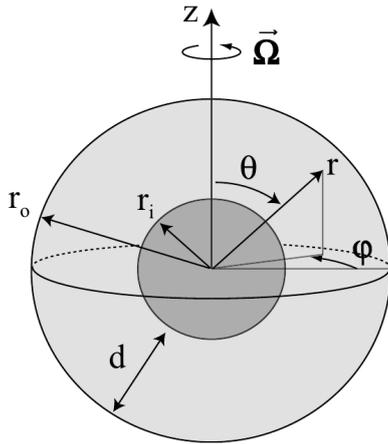
Mit den durchgeführten Simulationen wird das Ziel des Projekts sein, die bisher vorgeschlagenen Modelle zu bestätigen oder auszuschließen. Diese Modelle sollen als Vergleich für Messungen im Rahmen des BepiColombo-Projekts dienen.

#### WWW

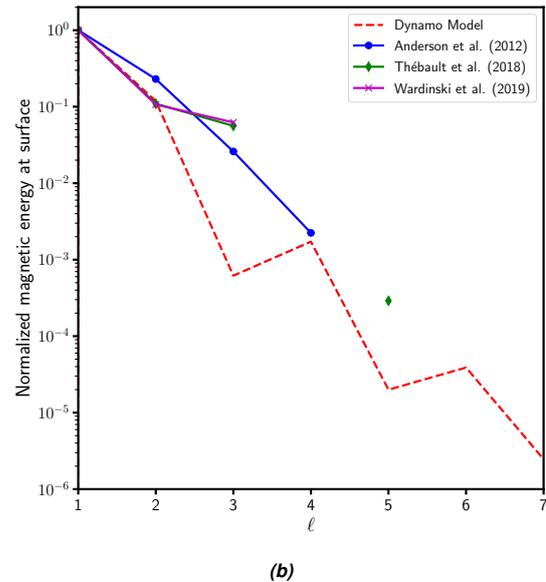
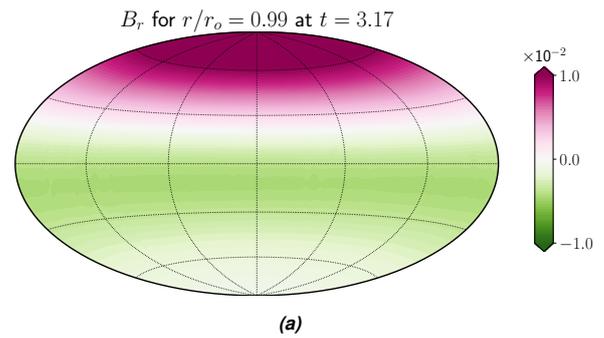
<https://www.tu-braunschweig.de/igep>

#### Weitere Informationen

- [1] Ness, N. F., et al., *Science* **185**, 151-160 (1974). doi:10.1126/science.185.4146.151



**Abbildung 1:** Skizze der Modellgeometrie zur Beschreibung des Dynamoproblems in einer Kugelschale. Die Kugelschale rotiert entlang der z-Achse mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\Omega} = \Omega \vec{e}_z$ . Die zwei Kugelschalen haben den Abstand  $d$ . Der Radius der inneren Kugelschale ist  $r_i$ , wobei der Radius der äußeren Schale  $r_o$  ist. Entnommen aus [12].



**Abbildung 2:** (a) Das radiale Magnetfeld an der Kern-Mantel-Grenze eines neuen Dynamomodells. (b) Vergleich der magnetischen Energie normalisiert auf den magnetischen Dipol mit den Feldmodellen, welche aus den bisherigen Messdaten gewonnen wurden.

- [2] Solomon, S. C., et al., *Planetary and Space Science* **49**, 1445-1465 (2001). doi: 10.1016/S0032-0633(01)00085-X
- [3] Anderson, B. J., et al., *Science* **333**, 1859-1862 (2011). doi:10.1126/science.1211001
- [4] Christensen, U. R., *Nature* **444**, 1056-1058 (2006). doi:10.1038/nature05342
- [5] Christensen, U. R. und Wicht, J., *Icarus* **196**, 16-34 (2008). doi: 10.1016/j.icarus.2008.02.013
- [6] Stanley, S., et al., *Earth and Planetary Science Letters* **234**, 27-38 (2005). doi: 10.1016/j.epsl.2005.02.040
- [7] Takahashi, F. und Matsushima, M., *Geophysical Research Letters* **33** (2006), doi: 10.1029/2006GL025792
- [8] Heimpel, M. et al., *Earth and Planetary Science Letters* **236**, 524-557 (2005). doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.032
- [9] Heyner, D., et al., *Science* **334**, 1690-1693, (2011). doi:10.1126/science.1207290
- [10] Cao, H., et al., *Geophysical Research Letters* **41**, 4127-4134, (2014). doi: 10.1002/2014GL060196
- [11] Takahashi, F., et al., *Nature Communications* **10**, 208, (2019). doi:10.1038/s41467-018-08213-7
- [12] MagIC Homepage: <https://magic-sph.github.io/>