

Magnetfelder überall im Sonnensystem

In Bezug zum SuW-Beitrag „Der Magnetfeldgenerator von Uranus und Neptun“ (Brennpunkt 2137) in SuW 03/2023, Rubrik „Blick in die Forschung: Nachrichten“, Zielgruppe: Oberstufe bis Mittelstufe, WIS-ID: 1571210

Olaf Fischer

Das Phänomen ‚Magnetfeld‘ erscheint uns zunächst sehr speziell zu sein. Dabei existieren Magnetfelder rund um uns in der Alltagswelt wie auch im nahen und fernen Weltraum. Während wir im Alltag den Kompass nutzen, installieren wir auf Raumsonden mittlerweile Magnetometer. Eines der wissenschaftlichen Erfolge der Voyager-Sonden war der Nachweis der (ungewöhnlich verkippten) planetaren Magnetfelder von Uranus und Neptun, deren Herkunft den Wissenschaftlern nach wie vor Rätsel aufgibt.

Der vorliegende WIS-Beitrag beinhaltet eine wissenschaftshistorisch-anekdotesche Motivation des Themas, Magnetfeldentstehung, eine Analyse von Feldlinienbildern planetarer Magnetfelder im Kontext ihrer rotierenden Planetenkörper, einen kurzen Hinweis auf die Räumlichkeit eines Magnetfelds und dessen Berücksichtigung bei Kompassbau und schließlich eine Spurensuche hinsichtlich der Bedingungen für planetare Magnetfelder.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Planeten	Neptun, Uranus
Physik	E-Lehre	Magnetfeld, <u>Oersted-Versuch</u> , <u>Kompass</u> , <u>Inklination</u> , <u>Bewegungsinduktion</u> , <u>Quadrupolfeld</u>
Fächer- verknüpfung	Astronomie – Geschichte	<u>Einordnung der Lebensdaten eines Wissenschaftlers in gesellschaftliches Umfeld</u>
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis, Kommunikation) Unterrichtsmittel	<u>Recherchearbeit</u> , <u>Bildanalyse</u> , <u>Arbeitsblatt mit Lesetext</u> , <u>Feldlinienbild für fünf Planeten</u>

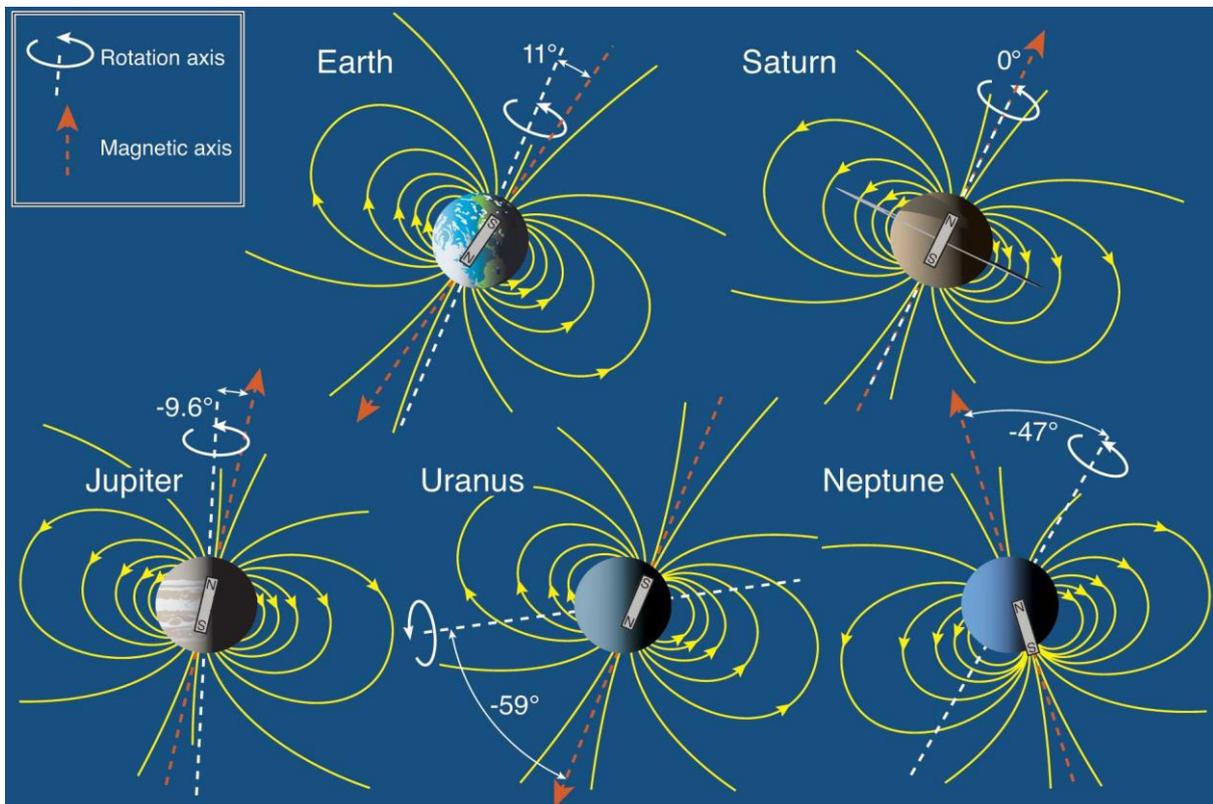


Abbildung 1: Dargestellt sind die Feldlinienbilder für fünf Planeten des Sonnensystems, wobei die Felder von Uranus und Neptun eigentlich Quadrupolfelder sind. Der jeweils ange deutete Stabmagnet soll jeweils das Zentrum und die Ausrichtung des Magnetfelds in Bezug auf den Planetenkörper und dessen Rotationsache andeuten.

©: Fran Bagenal & Steve Bartlett, <https://lasp.colorado.edu/home/mop/files/2012/04/4Tilts.jpg>.

[Zurück zum Anfang](#)

Lesetext zur möglichen Vorgeschichte des Oersted-Versuchs – eine wichtige Entdeckung

→ Arbeitsblatt: ‚Lesetext zum Oersted-Versuch.pdf‘

Der dänische Physiker Hans Christian Oersted machte eine wichtige Entdeckung. Lese dir den folgenden Text aus dem abgebildeten Buch durch und recherchiere etwas im Internet. Welche großen geschichtlichen Ereignisse fielen in die Lebenszeit von Oersted? Was erfährst du alles über den Physiker Oersted und seine wichtige Entdeckung? Wann wurden Uranus und Neptun entdeckt?

Im Physikhörsaal der Kopenhagener Universität versammelten sich die Studenten. Professor Oersted sollte seine Vorlesung halten. Die Studenten besuchten diese Vorlesungen gern, und umgekehrt hielt auch Oersted gern Vorlesungen. Er hatte mindestens vier Stunden Vorlesungen täglich, und wenn er keine Vorlesungen an der Universität zu halten hatte, veranstaltete er für die Öffentlichkeit sehr erfolgreich Vorträge über die neuesten Entdeckungen in Physik und Chemie.

Die letzten Studenten nahmen ihre Plätze ein, und der Universitäts-Famulus Jörgen schloss die Tür zum Hörsaal. Im gleichen Augenblick öffnete sich die Tür des Kabinetts, und an das Pult trat ein Mann mit ausdrucksvollen Gesichtszügen und an den Schläfen schon vorzeitig stark ergrauten Haaren, Professor Oersted. Er hielt etwas auf diesen effektvollen Eintritt, aber im Übrigen, war er ein herzenguter Mensch mit einem feinen Verhalten gegenüber anderen.

»Meine Herren!«, wandte er sich an die Studenten, »die allgemeinen Naturgesetze stehen miteinander in Verbindung, und gleichzeitig stehen auch die Naturerscheinungen untereinander in Verbindung.«

Oersted war ein ausgezeichnete Redner, schon seine ersten Worte fesselten die Studenten. Die heutige Vorlesung befasste sich mit den Zusammenhängen zwischen Wärme und Elektrizität. Wie gewöhnlich hatte er auch heute einem Versuch für die Studenten vorbereitet. Als die Reihe an den Versuch kam, begab er sich an den Tisch, auf dem Jörgen, alles sorgfältig aufgebaut hatte.

Auf Anweisung des Professors schaltete er den elektrischen Strom aus der Voltaschen galvanischen Batterie ein. Der Stromfluss durch einen dünnen Platindraht, der unter der Wirkung des Stromes erglühte. Oersted erläuterte den Versuch, und nur flüchtig bemerkte er, dass die an einem Faden in der Nähe des

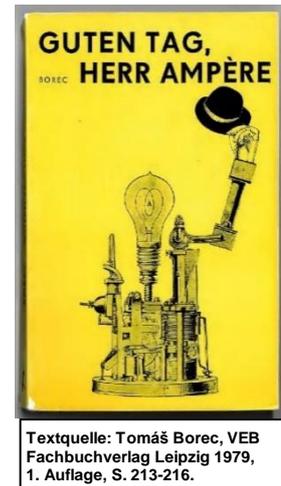
Platindrahtes aufgehängte Magnetnadel, die hier wahrscheinlich vom vorhergehenden Versuch zurückgeblieben war, beim Erglühen des Drahtes von ihrer Lage abwich. Zunächst hatte er dieser Tatsache keinerlei Bedeutung beigemessen, denn er glaubte, dass die Ablenkung durch die Temperatur des Drahtes verursacht wurde.

Oersted setzte den Versuch fort, und er hätte die ganze Angelegenheit längst vergessen, nur, als Jörgen einen dickeren Draht verwendete, der sich nicht so stark erhitzte und Oersted, geleitet von irgendeinem sechstem Sinn, auf die Magnetnadel schaute, wich diese wiederum ab. Als Jörgen den Strom ausschaltete, kehrte die Magnetnadel wieder in ihre ursprüngliche Lage zurück, obwohl der Draht noch heiß war.

»Na so was!« dachte sich Oersted beunruhigt, sollte das etwa ein Hinweis sein auf einen Zusammenhang, den er bereits seit langem annahm? Dass nämlich auch ein Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen existiert ... Dieser Gedanke war ihm schon im Jahre 1807 gekommen, doch hatte er ihn bisher noch nicht durch Versuche überprüft.

Oersted riss sich von diesen Gedanken los. Die geringste Unschlüssigkeit in der Vorlesung war bei ihm so ungewöhnlich, dass die Studenten aufmerksam wurden. Aber es geschah nichts Sensationelles. Oersted beendete, obwohl mit großer Selbstbeherrschung - als er Jörgen auftrug, nichts anzurühren - die Vorlesung.

Als der letzte Student den Hörsaal verlassen hatte, stürzte sich Oersted förmlich auf die Anlage. Immer wieder aufs Neue schaltete er den Strom ein und aus und beobachtete das Ausschlagen der Magnetnadel. In die Arbeit vertieft, bemerkte er gar nicht, dass es bereits Abend wurde.



Er eilte nach Hause, und obwohl er sonst Freunde und Gäste in seinem Hause zu jeder beliebigen Zeit gern begrüßte – heute wünschte er sich keine. Durch seinen Kopf wirbelten die Gedanken wie ein Karussell. »Morgen, morgen mache ich mich daran«, sagte er sich und zählte im Geiste die Voltaschen Elemente, die er in den verschiedenen Versuchsanlagen angeordnet hatte und die er jetzt alle für den neuen Versuch verwenden wollte.

Zu Hause entschuldigte er sich rechtzeitig bei den Gästen, aber in dieser Nacht schlief er nur wenig... Am anderen Tag stellte er mit Jörgen ein großes »galvanisches Gerät« aus zwanzig Voltaschen Elementen zusammen, um die Wirkung des Stroms auf die Magnetnadel möglichst gut beobachten zu können.

Die frei aufgehängte Magnetnadel, die in der waagerechten Lage beweglich war, nahm er in die Hand. Die Nadel stabilisierte sich in Nord-Süd-Richtung. Unter der Nadel ordnete er einen Leiter in gleicher Richtung wie die Nadel an. Als er den Strom einschaltete, schlug die Magnetnadel aus und verblieb in der neuen Lage, schräg zur Richtung des Leiters.

Die Versuche wiederholte er bei unterschiedlichen Bedingungen; über der Magnetnadel, unter ihr, seitlich und in verschiedenen Abständen und Richtungen verlief der Draht. Er stellte fest, dass die neu entdeckte Kraft die magnetischen Pole weder nur anzieht noch allein abstößt, sondern in Form von Kreislinien, in deren Zentrum jeweils die Leiter liegen, ausgerichtet ist.

Oersted war aber immer noch nicht von seiner Entdeckung überzeugt. Mit dem gesunden Zweifel eines Forschers prüfte er Leiter aus acht verschiedenen Metallen, allein die Abweichung der Magnetnadel verlief bei fast allen gleichartig. Die Wirkung der galvanischen Elektrizität auf die Magnetnadel erfolgte schließlich auch durch Hindernisse aus Metall, Glas, Holz, Wasser, Harz, Lehm und Stein hindurch. Schließlich legte er die Magnetnadel in ein mit Wasser gefülltes Messinggehäuse, die Wirkung blieb jedoch unverändert.

Als er jedoch »Magnetnadeln« aus Glas, Messing, Harz und anderen Stoffen fertigte, reagierten diese auf die Kraft des elektrischen Stroms nicht.

Ein Tag verging, ein Tag voller Arbeit, und Oersted vergaß das erste Mal seine geliebten Vorlesungen. Jörgen schickte er mit der Absage nach Hause, man solle ihn zur Nacht nicht erwarten ...

Nun war es jetzt bereits früh am Morgen, und Oersted hatte nicht ausgeschlafen, aber immer noch glücklich saß er im Arbeitszimmer. Ja, jetzt ist es schon klar!

Es war ihm gelungen, die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes zu entdecken und somit auch den Zusammen

hang zwischen Elektrizität und Magnetismus, den Zusammenhang zwischen zwei Gruppen von Erscheinungen, die seit Gilberts Zeiten für völlig zusammenhanglos gehalten wurden.

Oersted zog sich einen Sessel zum Tisch und legte Papier und Feder bereit. Er versank für einen Augenblick in Gedanken und begann dann in lateinischer Sprache zu schreiben: »Die galvanische Elektrizität, die über einer frei aufgehängten Magnetnadel vom Norden zum Süden verläuft, lenkt die Magnetnadel mit dem nördlichen Ende nach Osten ab; bei der gleichen Bewegungsrichtung der Elektrizität lenkt sie diese, wenn sie unter der Magnetnadel liegt, nach Westen ab ... «

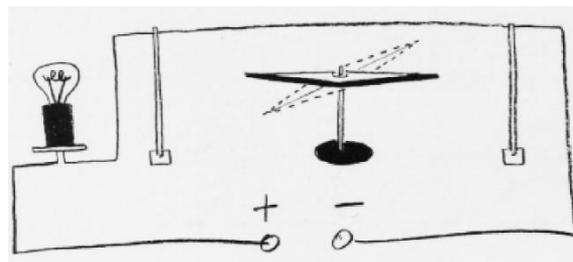


Abbildung 2: Aufbauskitze zum Oerstedt-Versuch

Er schrieb mehrere Stunden. Das Frühstück auf dem, Tisch war längst kalt geworden. Es war bereits Mittagszeit, als er auf den Umschlag den Namen des Adressaten schrieb: Andre Marie Ampere ...

Mögliche Resultate

- Hans Christian Oersted (1777 – 1851) war Physiker an der Universität von Kopenhagen,
- 1803-1815: Napoleonische Kriege und ab 1813 Befreiungskriege, 1813: Völkerschlacht bei Leipzig, 1848/49: deutsche Revolution
- Entdeckungen von Uranus: 1781 und Neptun: 1846
- 1820: Oersted-Versuch: die elektrische Erscheinung Stromfluss führt zu einem Magnetfeld rund um den stromdurchflossenen Leiter (Geburt des Elektromagnetismus)

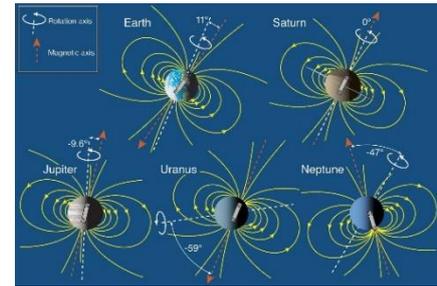
Planetare Magnetfelder und planetare Rotation

[Zurück zum Anfang](#)

Vergleiche die in Abb. 1 dargestellten planetaren Magnetfelder*. Achte dabei besonders auf die Lage von Feldachse und Rotationsachse sowie Feldmitte und Planetenkörpermitte.

Beschreibe Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

➔ **Bild ‚Feldlinienbilder für fünf Planeten des Sonnensystems.jpg‘**



* Bei Uranus und Neptun handelt es sich eigentlich um Quadrupolfelder, d. h. es gibt jeweils zwei Nord- und zwei Südpole.

Mögliche Resultate

- Gemeinsam ist allen fünf Planeten die Existenz eines Magnetfelds
- Die Magnetfelder von Erde, Saturn und Jupiter haben ihr Zentrum nahe dem Mittelpunkt des Planeten und ihre Feldachsen liegen etwa in Richtung der jeweiligen Rotationsachse
- Für die Erde zeigt der magnetische Südpol in Richtung des ekliptikalen Nordpols (was für einige überraschend sein könnte), für Saturn und Jupiter ist es der magnetische Nordpol
- Für Uranus und Neptun gibt es eine deutliche Diskrepanz zwischen der Richtung der Rotationsachse und der Feldachse

Magnetfelder füllen den Raum aus – eine wichtige Information

[Zurück zum Anfang](#)

Eine wichtige Erkenntnis zu Feldern ist ihre „Körperlichkeit“, d. h. ihre Raumausfüllung. Diese kann man schon bei einem normalen Kompass erahnen, wenn man sich die Ausrichtung der Magnetnadel genau anschaut (siehe Abb.). Die Nadel dreht sich sowohl horizontal (um die dabei angezeigte Richtung geht es ja bei einem Kompass) als auch vertikal (der Inklinationswinkel gibt die Abweichung von der Horizontalen an).

Um die Inklination zu messen, verwendet man speziell aufgehängte Magnetnadeln. Beim Bau eines Kompass ist die Inklination zu berücksichtigen, damit sich die Nadel ungehemmt horizontal drehen kann.

Dies geschieht z. B. dadurch, dass man die Magnetnadel angepasst an den jeweiligen Einsatzbereich durch unterschiedliche Masse der beiden Nadelhälften in Gleichgewichtslage bringt.

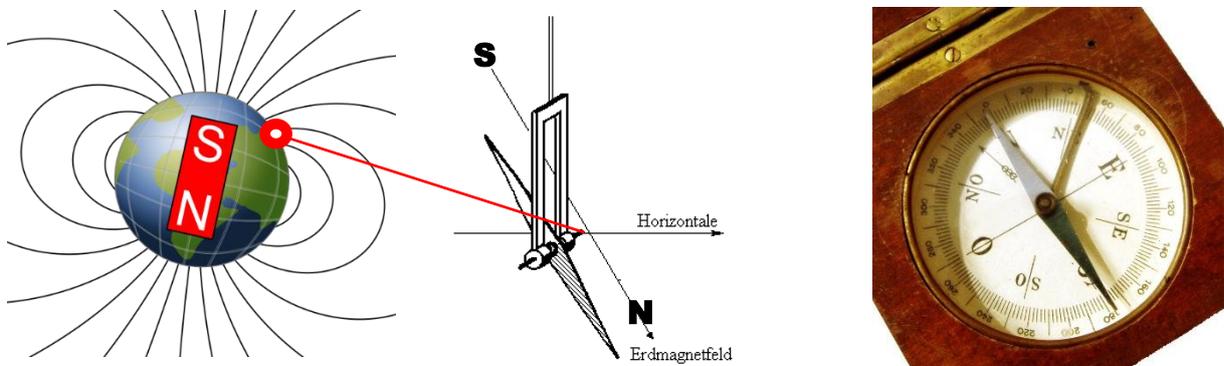


Abbildung 3: Links: Die Magnetfeldlinien durchstoßen die Erdoberfläche in unterschiedlichen Winkeln. In Deutschland sind es etwa 62°-70°. Mit Hilfe einer speziell aufgehängten Magnetnadel lässt sich die Neigung vermessen.

©: Zureks - Eigenes Werk, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18017000>.

Rechts: Auch beim Kompass kann man die Neigung der Feldlinien (Inklination) noch an der leichten Verkippung der Magnetnadel erkennen (siehe Schattenwurf). ©: By Made by Liquid_2003. - Modification du fichier Image:

Compass_in_a_wooden_frame.jpg (+transparence)., Copyrighted free use, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=765389>.

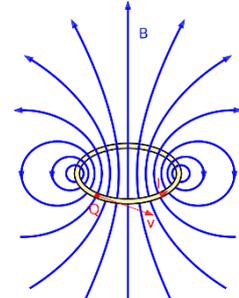
Den Bedingungen für planetare Magnetfelder auf der Spur

[Zurück zum Anfang](#)

Es bleibt die große Frage, woher die globalen Magnetfelder der Planeten stammen. Die Annahme eines Dauermagneten muss man zumindest für das Planeteninnere schnell aufgeben, wenn man bedenkt, dass im Inneren der Planeten noch Temperaturen herrschen, die eine ferromagnetische Magnetisierung aufheben. Übrig bleibt die Möglichkeit, die uns zum Ausgangspunkt dieses WIS-Beitrags zurückführt - zum **Zusammenhang zwischen Stromfluss und der Entstehung eines Magnetfelds (Oersted-Versuch)**.

Folgende Details dieses Zusammenhangs kann man **gemeinsam mit Schülern erarbeiten (eine Folgerungskette)**.

- 1.) **Wie lässt sich ein Magnetfeld ohne einen Dauermagneten erzeugen?**
 → **Benötigt wird ein Stromfluss, der ein Magnetfeld zur Folge hat, d. h. eine Art Dynamo.**



Der Stromfluss in einer Leiterschleife erzeugt ein Magnetfeld. Von 30px MovGP0 - selbst erstellt mit Inkscape, CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12759463>

- 2.) **Welche Voraussetzungen sind für einen Stromfluss nötig?**
 → **Zum einen benötigt man für einen Stromfluss bewegliche Ladungsträger, sprich ein leitendes Medium.**

Man betrachte also zunächst die Planeten, ob diese in ihrem Inneren ein leitendes Medium besitzen (siehe Abb. 4). **Was kannst du über das Innere der Planeten sagen?**

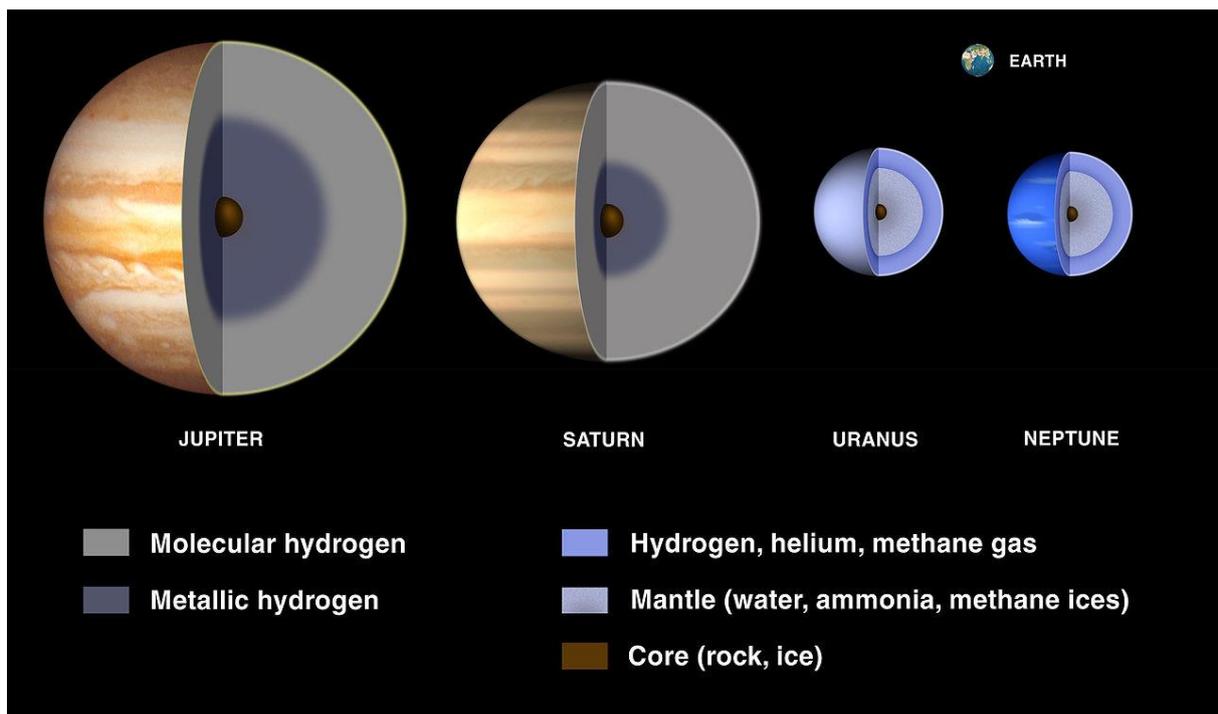
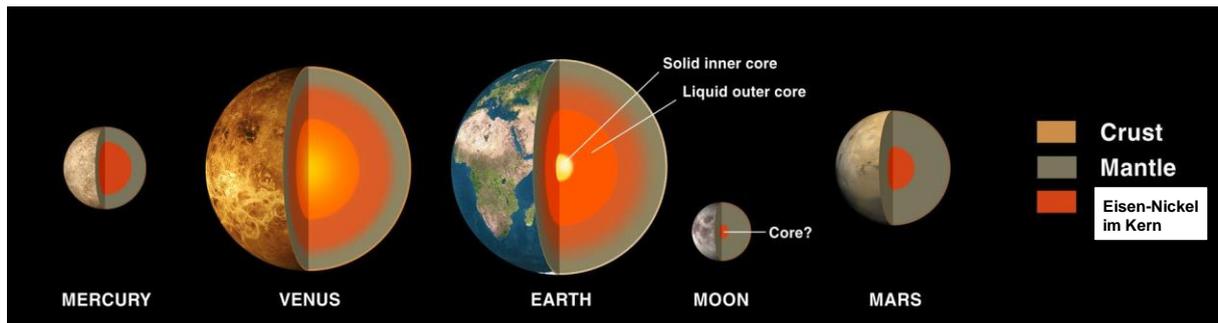


Abbildung 4: Innere Struktur der Gesteinsplaneten (©: NASA) und der vier Riesenplaneten des Sonnensystems (©: Lunar and Planetary Institute - <https://solarsystem.nasa.gov/galleries/gas-giant-interiors>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=245924>).

[Zurück zum Anfang](#)

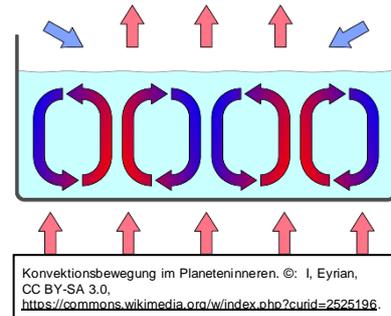
➔ Zum anderen benötigt man als „Stromantrieb“ eine Spannung.

3.) Wie kann man diese Spannung erzeugen?

➔ Induktion ist das Zauberwort. Wenn sich das leitende Planeteninnere in einem bereits vorhandenen Magnetfeld („Saatfeld“ genannt) bewegt (wie eine Leiterschleife bei einem Dynamo), dann wird meist eine Spannung induziert.

4.) Wodurch entsteht im Planeteninneren eine Bewegung des leitenden Materials?

➔ Im Inneren vieler Planeten entsteht durch das Temperatur- und Dichtegefälle eine Konvektionsbewegung. Die Gesteinsplaneten haben in ihrem Inneren **flüssige Eisen-Nickel-Bereiche**. Wäre es reines Eisen, dann würde die Wärme allein durch Leitung abtransportiert werden können. Der Nickelzusatz bewirkt, dass die Leitung eingeschränkt wird und die Konvektion in Gang kommt.

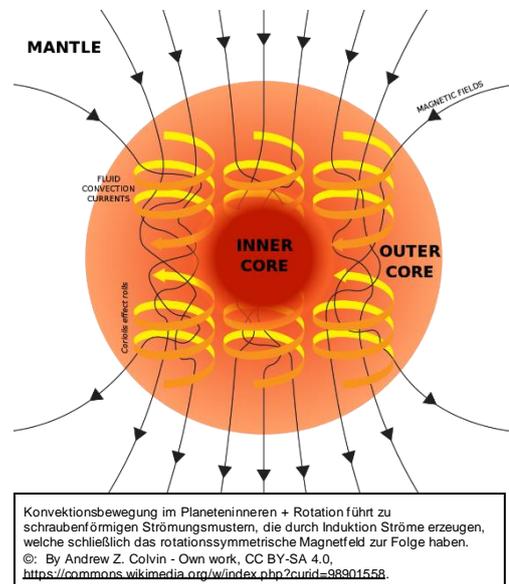


Bei den Gasplaneten konvektiert **metallischer Wasserstoff**.

Bei Uranus und Neptun, den sogenannten Eisriesen, vermutet man Konvektion in einem **superionischen Eismantel**.

5.) Es bleibt die Frage, warum in einer Kugel, in der Konvektion zentralsymmetrisch in alle Richtungen erfolgt, ein Dipolfeld entsteht, welches ja rotationssymmetrisch ausgerichtet ist?

➔ Allein schon die Tatsache, dass die Magnetfeldachsen der Dipolfelder der meisten Planeten mehr oder weniger mit den Rotationsachsen zusammenfallen (siehe Abb. 1), lässt die Vermutung aufkommen, dass die Rotation der Planeten eine wichtige Rolle bei der Entstehung ihrer planetaren Magnetfelder spielt.



Die Rotation der Planeten bewirkt, dass sich das leitfähige bewegliche Material im Inneren schraubenförmig parallel zur Rotationsachse bewegt. Diese Bewegung in einem bereits existierenden Magnetfeld führt zur Induktion von Strömen (**Bewegungsinduktion**), welche ihrerseits das bestehende Magnetfeld verstärken (Selbsterhaltung des Magnetfelds).

Es ist wichtig zu betonen, dass nicht die Bewegung der leitfähigen Materie zum Magnetfeld führt, sondern erst die Bewegung der Ladungsträger in Bezug auf ihr Medium (welche erst durch die induzierte Spannung möglich wird).

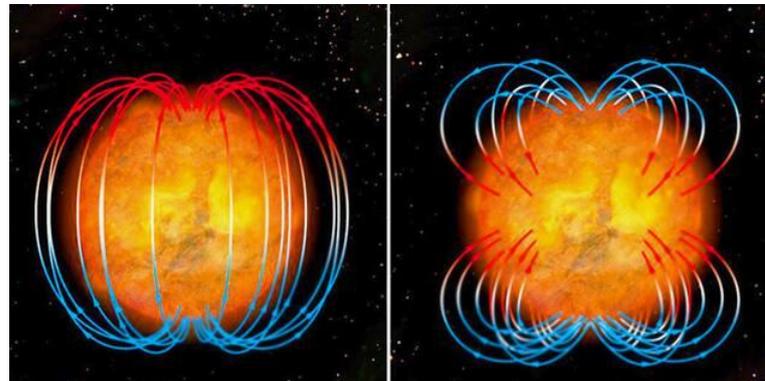
6.) Was unterscheidet die Magnetfelder von Neptun und Uranus von denen der anderen solaren Planeten?

[Zurück zum Anfang](#)

➔ Während die meisten solaren Planeten ein mehr oder weniger ausgeprägtes magnetisches Dipolfeld besitzen, wurde bei Uranus und Neptun ein Quadrupolfeld nachgewiesen.

Bei einem Quadrupolfeld gibt es zwei Nord- und zwei Südpole. Man geht davon aus, dass die Achse eines Polpaars in etwa mit der Rotationsachse übereinstimmt. Die andere Achse ist dazu geneigt und das Zentrum liegt nicht im Zentrum des Planeten (siehe Abb. 1 und Abb. Im Anhang).

Auch die Sonne besitzt ein Magnetfeld, welches vermutlich durch den Dynamomechanismus erzeugt wird. Dabei scheint es Phasen zu geben, in denen sich ein **Quadrupolfeld** ausbildet (siehe Bild).



Während die Sonne 2008 ein magnetisches Dipolfeld zeigte, konnte man 2012 ein Quadrupolfeld erkennen.

©: NAO, <https://www.nao.ac.jp/news/science/2012/20120419-polar-field-reversal.html>.

ANHANG

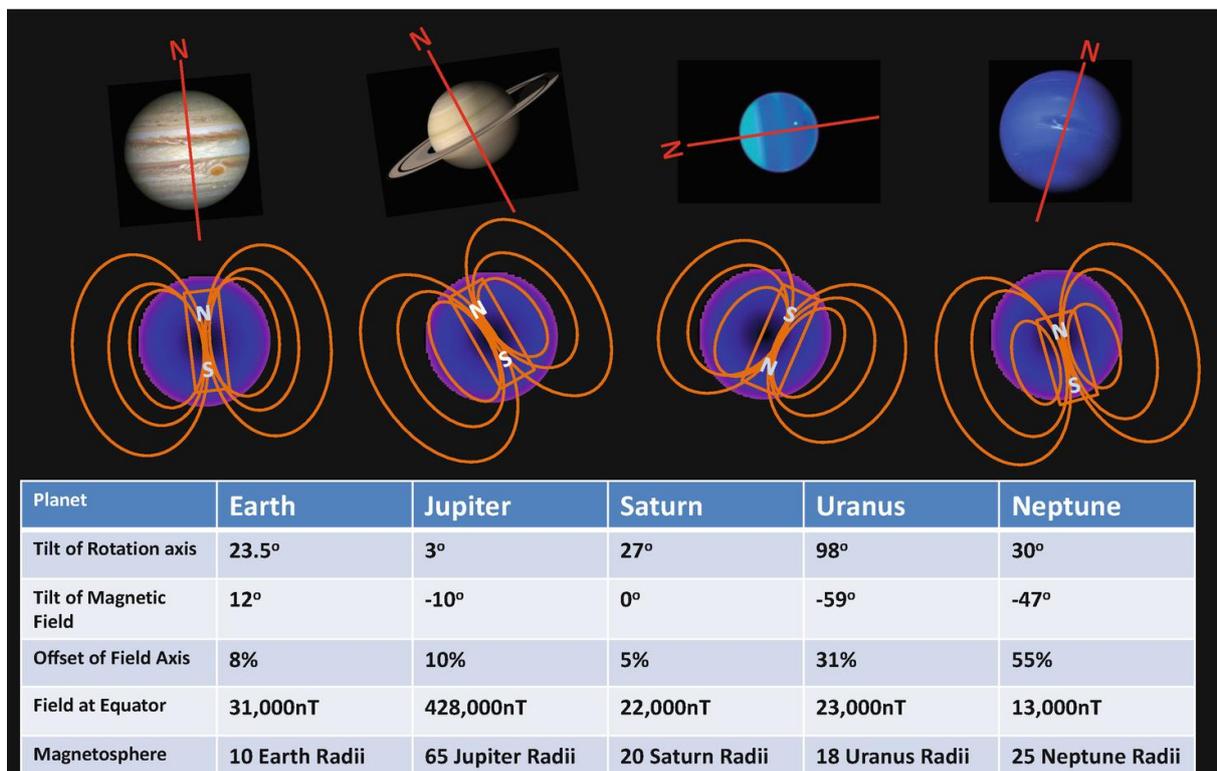


Abbildung 5: Vergleich der Magnetfelder der solaren Riesenplaneten.

© Magnetic field of the outer planets. Stevenson 2018, https://iaqa-aiga.blogspot.com/2021/08/planetary-magnetic-fields-gas-giants.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed:+iaqa-aigablog+%28IAGA-AIGA+blog%29&m=1.