

Die Magnetosphäre der Erde

Forschungsinfo 05/2005

Einleitung und Übersicht

Die Erdmagnetosphäre entsteht durch Einwirkung des Sonnenwindes (ein Strom elektrisch geladener Teilchen, der ständig von der Sonne abströmt) auf das Magnetfeld der Erde. Das Erdmagnetfeld ist ein Dipolfeld, wie wir es von einem Stabmagneten her kennen. Ohne Sonnenwind würden die Feldlinien die Erde völlig symmetrisch umgeben (Abb. 1). Der Sonnenwind drückt das Magnetfeld auf der vorderen, der Sonne zugewandten Seite zusammen und zieht es auf der hinteren Seite zu einem langen Schweif aus, der mehrere Millionen Kilometer in den Weltraum hinaus reicht (Abb. 2).

Vor dem Hindernis Magnetosphäre bildet sich im Sonnenwind eine Bugstoßwelle (wie bei einem mit Überschall fliegenden Düsenjäger), wobei der Sonnenwind von Überschall- auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wird. Die Schicht, die die

Magnetosphäre zum interplanetaren Raum hin abgrenzt, bezeichnet man als Magnetopause. Den Schweif der Magnetosphäre darf man sich nicht so statisch vorstellen, wie Abb. 2 vermuten lässt, tatsächlich flattert er im Sonnenwind wie eine Fahne im irdischen Wind.

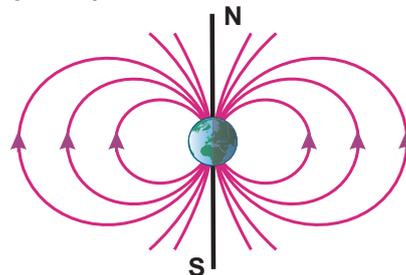


Abb. 1: Fiktives Abbild des Erdmagnetfeldes ohne Einwirkung des Sonnenwindes. Es wäre in diesem Fall symmetrisch wie das Feld eines Stabmagneten mit Nord und Südpol (N und S).

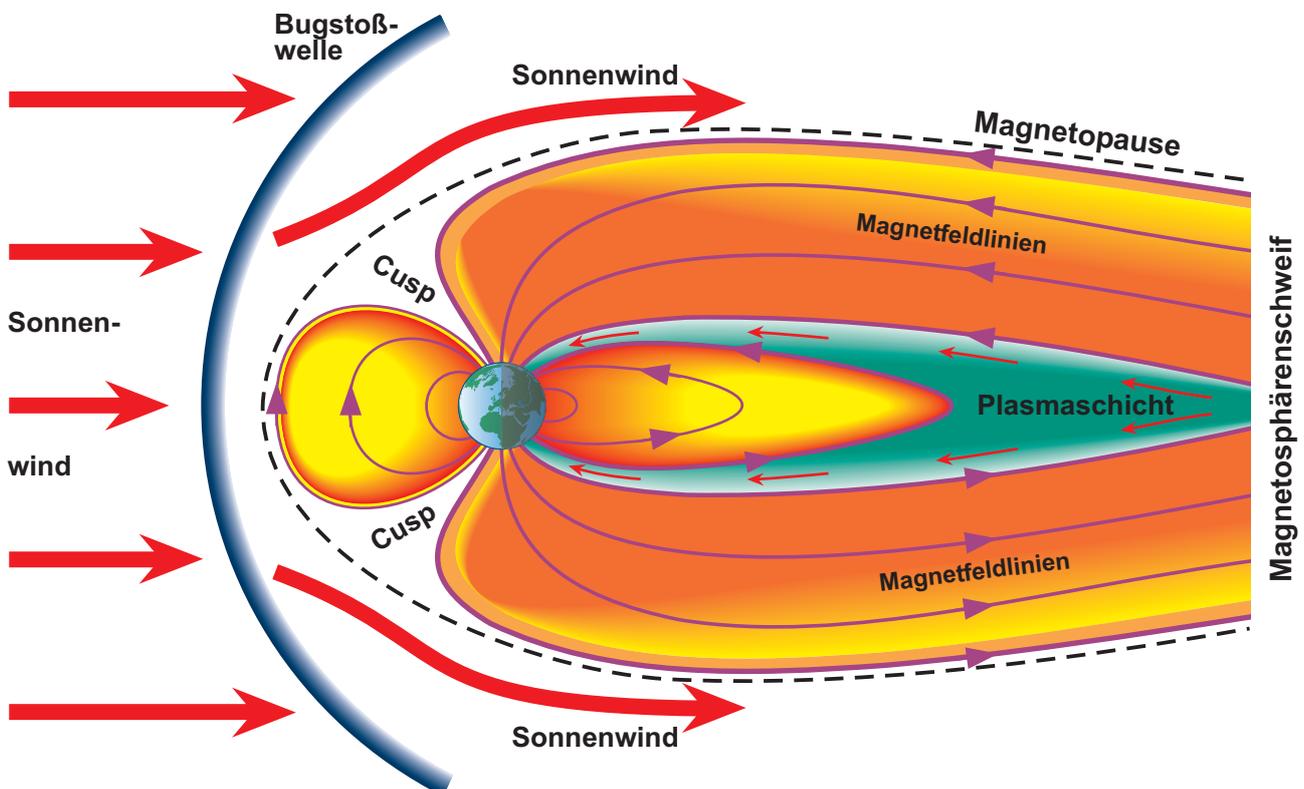


Abb. 2 Die Magnetosphäre der Erde im Längsschnitt (stark vereinfacht). Die Sonne muß man sich ganz weit links vorstellen

Die Magnetosphäre enthält ein Gas aus elektrisch geladenen Teilchen, ein sogenanntes Plasma, bestehend aus Ionen und Elektronen. Sie stammen zum Teil aus der Erdatmosphäre, zum Teil aus dem Sonnenwind. Da elektrisch geladene Teilchen sich nicht quer zu Magnetfeldlinien bewegen können, dringen Sonnenwindteilchen in der Regel nicht direkt vorn in die Magnetosphäre ein. Beim "Flattern" des Schweifs können sie aber durch komplizierte Vorgänge in dessen Inneres gelangen. Sonnenwindteilchen dringen auch durch zwei "Löcher" in die Magnetosphäre ein, die sich an der Grenze zwischen den nach vorn und den nach hinten gebogenen Feldlinien bilden, die sog. "Cusps" (Spalten). Die elektrisch geladenen Teilchen sammeln sich vorwiegend in der Äquatorebene des Schweifs, in der sog. Plasmaschicht (Abb. 2).

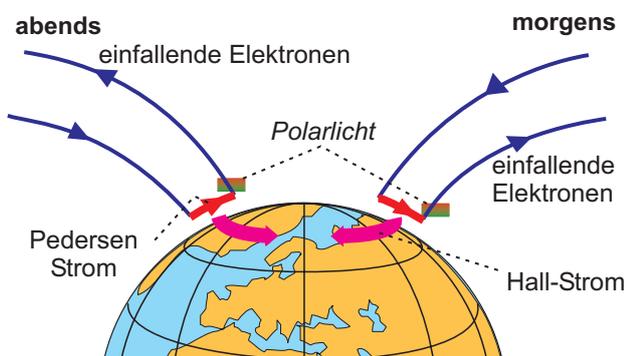


Abb. 3 Detail der Birkeland-Ströme in der nördlichen Polregion der Erde. Die Ströme fließen entlang der blau gezeichneten Magnetfeldlinien, getragen durch Elektronen, die sich auf Spiralbahnen um die Feldlinien bewegen. Entsprechende Ströme fließen auch in den südlichen Polregionen der Erde.

Birkeland-Ströme

Der an der Magnetosphäre vorbei strömende Sonnenwind wirkt zusammen mit dem interplanetaren Magnetfeld wie ein Dynamo. Er erzeugt quer zur Magnetosphäre ein elektrisches Feld, das komplizierte Driftbewegungen des Magnetosphärenplasmas in Gang setzt und elektrische Ströme antreibt, die hauptsächlich von den Elektronen aus der Plasmaschicht getragen werden. Diese Ströme fließen entlang der Magnetfeldlinien, wobei die Elektronen spiralförmige Bahnen um die Magnetfeldlinien ausführen. Abb. 3 zeigt ein stark vereinfachtes Schema der feldparallelen Ströme, der sog. Birkeland-Ströme (nach dem norwegischen Geophysiker Kristian Birkeland, 1867-1917). Auf der Morgenseite fließen die Birkeland-Ströme etwas nördlicher in die Erdatmosphäre hinein und etwas südlicher wieder heraus, am Abend sind die Verhältnisse umgekehrt (bei der Abb. 3 muss man berücksichtigen, dass aufgrund der allgemeinen Konvention über Stromrichtungen, abwärts fliegende Elektronen einen nach oben gerichteten Strom darstellen und umgekehrt). Die Birkelandströme schließen sich als sog. Pedersen-Strom in einer Höhe von 100-150 km über dem Erdboden. Dort ist die

Atmosphäre elektrisch leitend weil die Gase durch die Ultraviolettstrahlung der Sonne zum Teil ionisiert werden. Zusätzlich zu den Pedersen-Strömen gibt es in dieser Höhe auch einen Hall-Strom, der ost-westwärts gerichtet ist. Die Stromdichten der Hall- und Pedersen-Ströme liegen meistens bei einigen A/m². Berücksichtigt man, dass die Höhenausdehnung der Stromschichten ca. 30 km und die Horizontalausdehnung einige 100 km beträgt, kommt man auf Ströme von einigen 10.000 Ampere.

Magnetfeldänderungen am Boden, die durch diese Ströme hervorgerufen werden, beobachtet man schon seit Carl Friedrich Gauss (Göttinger Magnetischer Verein, Gründung um 1840) mit Magnetometern.

Polarlichter

Einige der Elektronen, die die Birkelandströme tragen, stoßen in Erdnähe mit Molekülen und Atomen der Luft (N₂, O₂, O) zusammen und regen diese zum Leuchten an. Dabei entstehen vorwiegend grüne und rote Farbtöne, die das Polarlicht bilden. Die schnell variierenden Muster des Polarlichts am Himmel spiegeln die veränderlichen Magnetfeldkonfigurationen im flatternden Magnetosphärenschweif wieder (Abb. 4).



Abb. 4 Polarlicht mit roten und grünen Farbtönen

Der Ringstrom

Ein weiteres wichtiges Stromsystem in der Magnetosphäre fließt im Bereich der Strahlungsgürtel, die 1958 mit Hilfe der ersten Satelliten (Explorer) entdeckt wurden. Nach ihrem Entdecker (James A. van Allen) werden sie auch van-Allen-Gürtel genannt. Sie umgeben die Erde in der Äquatorebene wie ein Ring, wobei der innere Strahlungsgürtel bei einem Abstand von 8.000 bis 16.000, der äußere bei einem Abstand von 20.000 bis 50.000 km vom Erdmittelpunkt liegt. Die Ladungsträger des inneren Strahlungsgürtels, Protonen und Elektronen, entstehen vorwiegend bei der Ionisation von Luftbestandteilen durch kosmische Strahlung, die ständig aus dem Weltraum auf die Erde trifft. Sie weisen im Vergleich zu den Teilchen aus der Plasmaschicht sehr hohe Energien auf. Die Teilchen des äußeren Gürtels

stammen aus der Ionosphäre und der Plasmaschicht. Innerhalb der Strahlungsgürtel sind die Ionen und Elektronen auf geschlossenen Feldlinien des Erdmagnetfelds gefangen, wie Abb. 5 veranschaulicht. Sie spiralen entlang der Feldlinien und werden in Erdnähe, dort wo die Magnetfeldlinien zusammenlaufen und das Magnetfeld stärker wird, an den sog. Spiegelpunkten reflektiert. Sie wandern daher dauernd zwischen Nord- und Südhalbkugel hin und her. Dabei driften beide Teilchenarten um die Erde, die Elektronen nach Osten, die Ionen (Protonen) nach Westen. Dadurch ergibt sich ein Strom, der kreisförmig um die Erde herum gerichtet ist, der Ringstrom. Die Stromdichten sind sehr variabel, typische Werte liegen bei einigen Zehntel A/m^2 . Da der Ringstrom aber einen weiten räumlichen Bereich erfüllt, ergibt sich eine Gesamtstromstärke von vielen Millionen Ampere.

Magnetische Stürme

Der Sonnenwind weht nicht immer gleichmäßig. Durch explosive Prozesse werden mitunter riesige Gasmassen aus der Sonne herausgeschleudert. Diese "Böen" im Sonnenwind können die Magnetosphäre besonders stark zusammenpressen und durchschütteln. Dabei werden auch die Birkeland-Ströme und die Hall- und Pedersen-Ströme verstärkt. Letztere können auf über 1 Million Ampere ansteigen.

Am Erdboden erzeugen die Ströme Magnetfeldänderungen, die so stark sein können, dass eine Magnetonadel zittert. Aufgrund derartiger Beobachtungen prägte A. v. Humboldt den Begriff "magnetisches Ungewitter", woraus die heutige Bezeichnung "magnetischer Sturm" herrührt. Der deutsche Geophysiker Julius Bartels (1899-1964) führte in den 1940er Jahren Indizes zur Kennzeichnung der geomagnetischen Aktivität ein, die sog. Kp-Werte. Sie reichen von 0 (extrem ruhig) bis 9

(extrem gestört), wobei zur feineren Unterteilung noch ein + oder - angehängt wird (z.B. 3+, 6-).

Neben Hall- und Pedersen-Strömen werden bei magnetischen Stürmen auch die Ringströme intensiviert, und zwar dadurch, dass Teilchen aus dem Schweif der Magnetosphäre in dieses Stromsystem injiziert werden. Die Magnetfeldänderung, die die Ringstromverstärkung zur Folge hat, ist dem normalen Erdmagnetfeld entgegengesetzt, daher beobachtet man bei starken magnetischen Stürmen in der Nähe des Äquators eine Verminderung des am Boden gemessenen Magnetfelds. Aus dieser Magnetfeldreduzierung wird der sog. Dst-Index gewonnen, der ebenfalls die Stärke eines Magnetsturms kennzeichnet.

Bei starken magnetischen Stürmen können die Magnetfeldlinien im Schweif so stark verbogen werden, dass das System der Hall- und Pedersen-Ströme, das normalerweise in hohen geografischen Breiten liegt, weit zum Äquator hin verschoben wird. Dadurch werden auch bei uns in Mitteleuropa (oder sogar noch weiter südlich) Polarlichter sichtbar, wie zuletzt mehrfach in den Jahren 2000 bis 2003.

Für gewöhnlich besteht ein geomagnetischer Sturm aus einer Folge von sogenannten Teilstürmen, die in der Regel 10 bis 30 min andauern. Sie entstehen dadurch, dass unter geeigneten Bedingungen Magnetfeldlinien der Erde mit dem im Sonnenwind eingeschlossenen Magnetfeld der Sonne verschmelzen können, und damit die sonst meist geschlossene Magnetopause in einem grossen Bereich durchlässig wird. Es gelangen dann gewaltige Energiemengen aus dem Sonnenwind direkt in die Magnetosphäre. Bis zu einer kritischen Grenze kann diese Energie im Schweif gespeichert werden. Wird diese Grenze überschritten, wird der Magnetosphärenschweif instabil und ein Teilsturm bricht aus. Hierbei reißen Teile des Schweifes

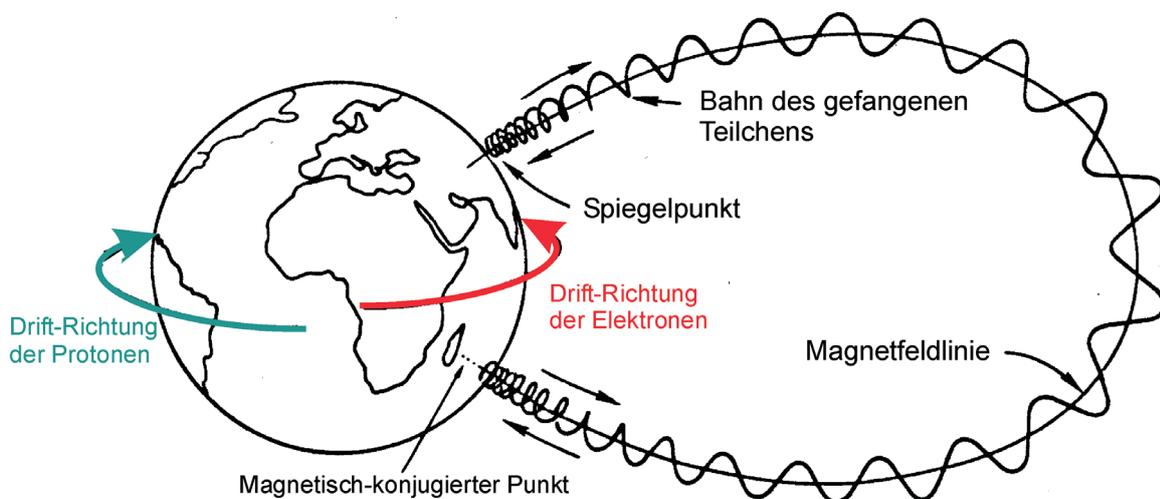


Abb. 5 Zur Entstehung des Ringstroms: Im Erdmagnetfeld gefangene Teilchen (Elektronen und Protonen) spiralisieren um die Magnetfeldlinien, wobei sich ihre Bewegungsrichtung an den Spiegelpunkten über der Nord- und Südhalbkugel jeweils umkehrt. Zusätzlich driften beide Teilchen um die Erde herum.

ab und werden in den Weltraum hinaus katapultiert. Im erdnahen Bereich verstärken sich die Ströme, die geladenen Teilchen der Plasmaschicht werden beschleunigt, und es treten besonders intensive Polarlichter auf.

Magnetische Stürme sind ein Phänomen des Weltraumwetters, das wesentliche Auswirkungen auf technische Systeme am Erdboden und im erdnahen Weltraum (Satelliten, Kommunikation, Navigation) hat und auch das irdische Klima beeinflusst.

Es sei betont, dass die Vorgänge in der Magnetosphäre hier sehr vereinfacht dargestellt wurden. Es handelt sich um komplizierte Plasmaprozesse, die man auch heute noch nicht in allen Einzelheiten versteht.



Abb. 6: Teilchenanalysator auf dem ersten deutschen Forschungssatelliten AZUR (1969). Dieses Gerät wurde am Institut entwickelt und gebaut und begründete die lange Erfahrung auf dem Gebiet der Magnetosphärenmessungen.

Beiträge des MPS

Nach der Entdeckung der Magnetosphäre in den 1960er Jahren durch die ersten Satelliten wurden nahezu alle weiteren Kenntnisse ebenfalls mit Hilfe von Instrumenten gewonnen, die auf Satelliten und Raumsonden zum Einsatz kamen. Das MPI für Sonnensystemforschung (vor 2004: MPI für Aeronomie) hat von Anfang an eine wichtige Rolle bei der Magnetosphärenforschung gespielt. Beginnend mit dem ersten deutschen Forschungssatelliten AZUR im Jahre 1969 waren Wissenschaftler unseres Instituts mit ihren Instrumenten an 14 Satellitenmissionen und zahlreichen Forschungsraketen-Kampagnen beteiligt. Im Vordergrund stand dabei die Analyse der Elektronen und Ionen in der Magnetosphäre. Die Messgeräte dazu, die Masse, Ladung, Energie Geschwindigkeit und Flugrichtung der Teilchen bestimmten, wurden alle am Institut entwickelt und gebaut. Die gemessenen Daten, die sehr unterschiedlich in den verschiedenen Bereichen der Magnetosphäre sind, haben wesentlich zu unserem heutigen Verständnis der Magnetosphäre und der darin ablaufenden physikalischen Vorgänge beigetragen. Vorläufige Krönung dieser Forschung ist die Beteiligung an der im Sommer 2000 gestarteten Mission "Cluster II". Hier werden insgesamt 4 gleiche

Satelliten eingesetzt, die die Erde in einer Tetraeder-Formation umkreisen. Dadurch wird es erstmalig möglich, räumliche und zeitliche Variationen in der Magnetosphäre unabhängig voneinander zu erfassen.

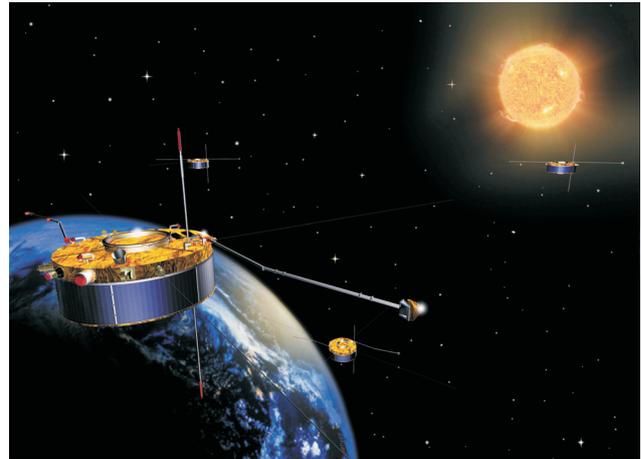


Abb. 7 Die vier Cluster Satelliten in der Magnetosphäre

Die Erdmagnetosphäre ist kein Einzelfall in unserem Sonnensystem, alle Planeten, die ein eigenes Magnetfeld besitzen, bilden unter Einwirkung des Sonnenwindes eine Magnetosphäre aus. Wegen seines starken Magnetfelds ist z.B. die Magnetosphäre des Jupiters ca. 100 mal größer als die der Erde. Könnte man sie sehen, erschiene sie trotz der grossen Entfernung größer als der Vollmond. Unter Beteiligung des MPS wird diese Magnetosphäre mit der Raumsonde GALILEO, die den Jupiter von 1995 bis 2003 umkreiste, intensiv erforscht. Im Jahre 2004 erreichte die Raumsonde CASSINI, die bereits 1997 gestartet wurde, mit Messgeräten des MPS an Bord den Saturn. Sie erweitert mit der Erforschung seiner Magnetosphäre unser Verständnis von den komplexen physikalischen Vorgängen in planetaren Magnetosphären ganz beträchtlich.

Kristian Schlegel, Joachim Woch

Internet Seiten zur Magnetosphäre:

<http://www.mps.mpg.de/de/projekte/magnetosphaeren.html> (MPS-Seiten in Englisch)

<http://clusterlaunch.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=8> (Cluster-Homepage)

<http://www.cetp.ipsl.fr/~isgi/homepag1.htm> (kp, Dst und andere Parameter)

<http://www.sel.noaa.gov/today.html> (Weltraumwetter)

<http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html> (weitere Einführung, englisch)

<http://climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html>
<http://www.dcs.lanacs.ac.uk/iono/aurorawatch/> (Polarlichter)