

4 Die Magnetosphäre

Der Sonnenwind trifft auf seiner Reise durch das Sonnensystem auf ein Hindernis, und zwar auf das riesige, dipolare *Magnetfeld der Erde*⁶⁷. So als wäre im Erdinneren ein Stabmagnet, treten seine magnetischen Kraftlinien am geomagnetischen Nordpol aus, ziehen sich in Erdnähe durch den Raum und treten am geomagnetischen Südpol wieder in die Erde ein (Abb.5). Die Magnetachse ist gegenüber der Rotationsachse um 11,25° geneigt, deshalb weist eine Kompaßnadel in mittleren Breiten fast genau in geographische Nord-Süd-Richtung zu den geomagnetischen Polen.

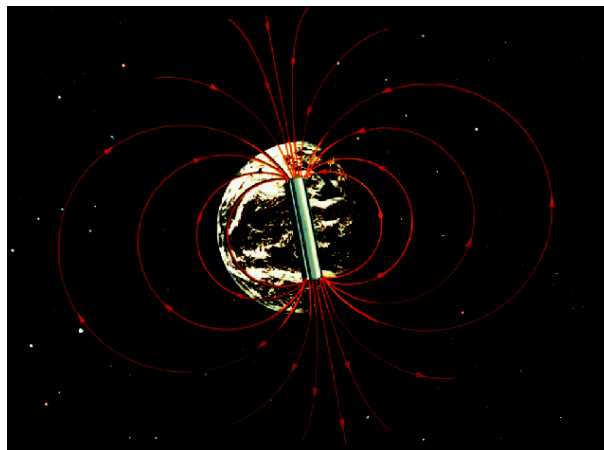


Abb. 1: Die Feldlinien dieses Stabmagneten repräsentieren das Erdmagnetfeld. Sie entspringen am geomagnetischen Nordpol und treten am geomagnetischen Südpol wieder in die Erde ein.

Dieser heranströmende, aufgeladene Partikelstrom preßt das Erdmagnetfeld auf der sonnenzugewandten Seite zusammen und dehnt es auf der sonnenabgewandten Seite zu

⁶⁷ Zum *Erdmagnetfeld* vgl. besonders:

LANG, a. a. O., S. 157 f

BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 38 ff

einem langen *Schweif* aus. Der so gebildete Hohlkörper, ein tropfen -oder tunnelförmiger Stromlinienkörper in dessen Innerem das planetare Magnetfeld dominiert, wird *Magnetosphäre*⁶⁸ genannt (Abb. 6).

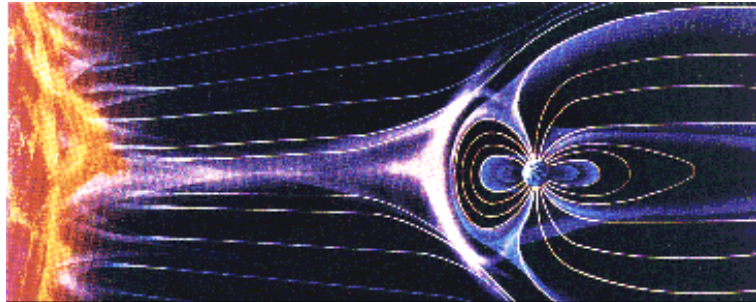


Abb. 2: Durch die Kompression des Erdmagnetfeldes vom Sonnenwind bildet sich die tropfenförmige, kometenähnliche Magnetosphäre aus.

Die Berandung bzw. die äußere Begrenzung dieses länglichen, kometartigen Körpers gegen den interplanetaren Raum, ein ca. 100 km dicker Mantel, nennt sich *Magnetopause*⁶⁹. Der dichte, bereits durch die Ausdehnung erkaltete Sonnenwind umströmt diesen Hohlraum, welcher mit heißem, dünnem, aus Protonen und Elektronen vom Sonnenwind und der Ionosphäre bestehendem Plasma gefüllt ist, ähnlich wie das Wasser eines Baches einen Stein umfließt. Durch seinen hohen, kinetischen Druck komprimiert der Sonnenwind die Magnetosphäre auf der Tagseite oder sonnenzugewandten Seite (Luvseite) auf eine Distanz von ca. 10 R_e (10 Erdradien \approx 60.000 km) von der Erde. An dieser Stelle ist ein Gleichgewicht gegeben zwischen dem magnetischen Druck des Erdmagnetfeldes und dem kinetischen Druck der Plasmaströmung, während die Magnetosphäre auf der Nachtseite oder sonnenabgewandten Seite (Leeseite) zu einem, bis zu 1000 R_e langen Schweif mit einem

⁶⁸ Zur *Magnetosphäre* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S.105 ff
KERTZ, a. a. O., S. 379 f
BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 535
LANG, a. a. O., S. 159 ff

⁶⁹ Zur *Magnetopause* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 119 ff
KERTZ, a. a. O., S. 383 ff

Durchmesser von 30 bis 60 R_e verformt bzw. ausgedehnt ist. Dies wird wahrscheinlich verursacht durch Impulsübertragung turbulenter, tangentialer Reibungskräfte des Sonnenwindes auf die Magnetopause.

Auf der sonnenzugewandten Seite entsteht im Sonnenwind durch den Übergang von einer Überschall- in eine Unterschallströmung eine sog. stehende *Schockfront* bzw. *Bugstoßwelle (Bow Shock)*⁷⁰ (Abb. 7), ganz ähnlich wie beim Überschallflugzeug-Phänomen, oder wie die Wellen, die sich vor dem Bug eines fahrenden Schiffes auftürmen. Auch bei sehr schnell strömenden Flüssen beobachtet man manchmal dicht oberhalb eines Hindernisses eine feststehende Stufe im Wasserspiegel. Dieses Phänomen (Wassersprung) bildet sich dann aus, wenn die Strömungsgeschwindigkeit größer ist als die Geschwindigkeit der Wellen.

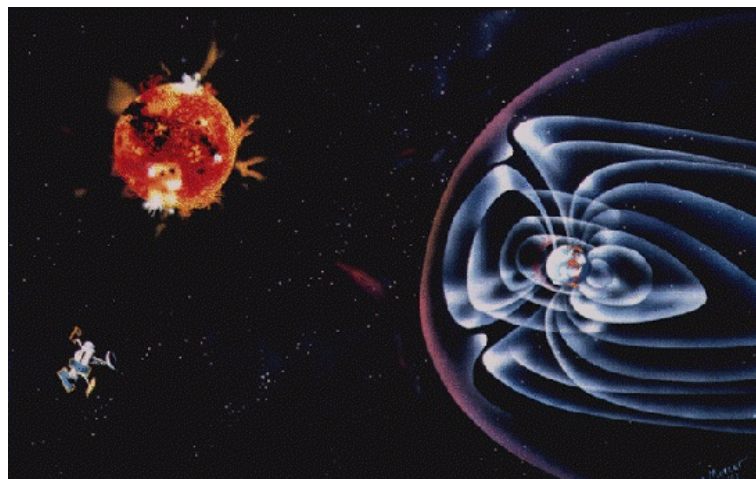


Abb. 3: Die Bugstoßwelle der Magnetosphäre ist ca. 800.000 km von der Erde entfernt.

Die Bugstoßwelle ist ca. 3 R_e von der Magnetopause entfernt. Durch das starke Abbremsen des Sonnenwindes in der Bugstoßwelle erfährt er eine sog. *Thermalisierung*⁷¹, d. h. es kommt zu einer Umwandlung eines Großteils seiner

⁷⁰ Zur *Bugstoßwelle* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S.86 ff
KERTZ, a. a. O., S. 385 ff

⁷¹ Zur *Thermalisierung* vgl. besonders:
BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 535 ff

kinetischen Energie in thermische Energie bzw. er erwärmt sich, wie die Räder eines Autos beim plötzlichen Bremsen. Hinter der Bugstoßwelle setzt er seine Strömung mit Unterschallgeschwindigkeit als heißes, dichtes Plasma fort. Ist der kinetische Druck des Sonnenwindes sehr hoch, bewegt sich die Bugwelle nach innen, läßt der Druck nach, dehnt sich das Erdmagnetfeld aus. Die ganze Magnetosphäre wird zusammengedrückt und gedehnt, sie ändert ihre Größe je nach Dichte und Geschwindigkeit des Sonnenwindes (Abb. 8).

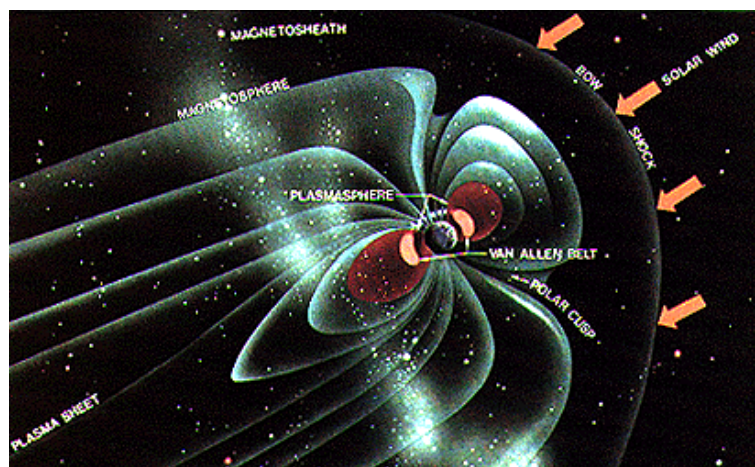


Abb. 4: Die Magnetfeldlinien sind auf der sonnenzugewandten Seite zusammengedrückt und auf der sonnenabgewandten Seite zu einem langen Schweif ausgedehnt. Ist der kinetische Druck des Sonnenwindes besonders groß, bewegt sich die Bugstoßwelle nach innen in Richtung Erde.

Beim Auftreffen der Sonnenwindpartikel auf die Magnetopause kommt es aufgrund der Lorentz-Kraft zu einer zusätzlichen Ablenkung, der Bewegung von geladenen Teilchen in einem Magnetfeld. Von der Erde aus betrachtet werden die Protonen des Sonnenwindes nach rechts, die Elektronen nach links abgelenkt. Sie bilden somit einen positiven Pol auf der Morgenseite und einen negativen Pol auf der Abendseite. Da die Magnetosphäre mit leitfähigem Plasma gefüllt ist, kann zwischen diesen Polen ein elektrischer Strom fließen.⁷²

⁷² Vgl. TIPLER, a. a. O., S. 903 ff

Die Verformung des Erdmagnetfeldes zur schweifartigen Magnetosphäre wird von äußerst starken elektrischen Strömen⁷³ begleitet (Abb. 9). So entstehen auf der sonnenzugewandten Seite der Magnetosphäre senkrecht zu den Magnetfeldlinien fließende, elektrische Ströme, der sog. *Magnetopausenstrom* oder *Chapman-Ferraro-Strom*⁷⁴. Auf der sonnenabgewandten Seite wird der Magnetosphärenschweif ebenfalls durch ein großräumiges Stromsystem durchdrungen, dem *Schweifstrom* und *Neutralschichtstrom*.⁷⁵ Im Inneren der Magnetosphäre fließt noch ein wichtiges Stromsystem, das von hochenergetischen Protonen getragen wird, der *Ringstrom*. Diese im Erdmagnetfeld gefangenen Teilchen mit relativ großen Energien bewegen sich permanent entlang den Feldlinien von der einen Hemisphäre zur anderen, werden dort gespiegelt und laufen wieder zurück. Bei diesem Hin- und Herpendeln zwischen Nord- und Südhalbkugel erfolgt aufgrund der Krümmung der Magnetfeldlinien und der Gravitation eine langsame Westdrift der Protonen und eine Ostdrift der Elektronen. Diese Teilchen bestimmter Bewegungsenergie sind sozusagen in einem *magnetischen Käfig*⁷⁶ gefangen, der einen festgelegten Raum im Erdmagnetfeld beansprucht und der die Erde wie eine sog. Kalotte bzw. eine gekrümmte Fläche eines Kugelabschnitts umschließt. Diese Ost-West-Drift verursacht eine äquatoriale Komponente, die zur Deutung des Ringstroms herangezogen wird.

Neben diesen magnetosphärischen Stromsystemen gibt es noch weitere Stromsysteme⁷⁷, deren Ströme nicht nur senkrecht zu den Magnetfeldlinien, sondern auch teilweise parallel zu ihnen fließen.

⁷³ Zu den *magnetosphärischen Strömen* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 105 ff

⁷⁴ Zum *Chapman-Ferraro-Strom* vgl. besonders:
KERTZ, a. a. O., S. 383 ff
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 106

⁷⁵ Zu *Schweifstrom* und *Neutralschichtstrom* vgl. besonders:
EDWARD W. HONES, *Der Schweif der Erdmagnetosphäre*. In: *Spektrum der Wissenschaft* 5/1986, S. 120 ff
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 106

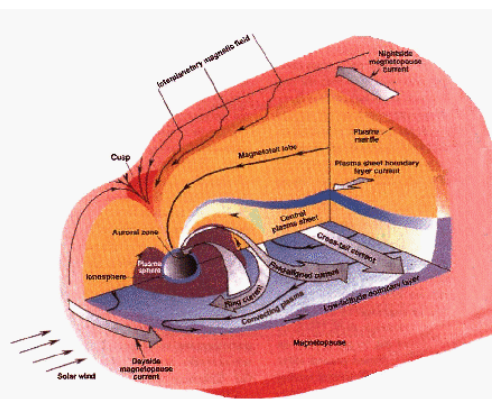
⁷⁶ Zu dem *magnetischen Käfig* vgl. besonders:
BERGMANN/SCHÄFER, a. a. O., S. 47 f

⁷⁷ Zu den *ionosphärischen Stromsystemen* vgl. besonders:
SYUN-ICHI AKASOFU, *Polarlichter*. In: *Spektrum der Wissenschaft* 7/1989, S. 45 f

Die feldparallelen Ströme, die sog. *Birkeland-Ströme*⁷⁸, verbinden Ströme in der magnetosphärischen Grenzschicht mit denen in der polaren Ionosphäre und ermöglichen somit einen Energieaustausch zwischen diesen Regionen, d. h. es fließen Teilchen längs der Feldlinien in die Ionosphäre hinein bzw. wieder hinaus. Dabei beziehen die Ströme in der Grenzschicht der Magnetosphäre ihre Energie aus der kinetischen Energie des heranströmenden Sonnenwindes.

Die *polaren Elektrojets*⁷⁹, die sowohl feldparallele, als auch senkrecht zum Magnetfeld in der Ionosphäre und Magnetosphäre fließende Ströme beinhalten, sind das größte dieser dreidimensionalen Stromsysteme. Diese Ströme haben ihren Ursprung am positiven Pol, fließen spiralförmig entlang den Magnetfeldlinien in die Ionosphäre, durch diese hindurch quer über die Polarregion und schließlich wieder die Magnetfeldlinien hinauf zum negativen Pol. Die ionosphärischen Teile dieser polaren Elektrojets bilden die westwärts (im Morgensektor der Hemisphäre) und ostwärts (im Abendsektor) fließenden jetartigen *Hall-Ströme* und die südwärts und nordwärts fließenden *Pedersen-Ströme*. Diese Ströme entstehen dadurch, daß einfallende, energetische Elektronen eine erhöhte, elektrische Leitfähigkeit in dieser polaren Zone verursachen.

Im Inneren⁸⁰ der Magnetosphäre fließen von außen nach innen nach der Magnetosphäre energetischen Ionen und Elektronen mit einer Dichte von 100.000 pro m³ (1/10 der Dichte in der Magnetosphäre ein, wo die Dichte nur 10.000 pro m³ beträgt) kommt in das Gebiet der Magnetosphäre ein, wo die Dichte nur 10.000 pro m³ beträgt)



von außen nach innen nach der Magnetosphäre energetischen Ionen und Elektronen mit einer Dichte von 100.000 pro m³ (1/10 der Dichte in der Magnetosphäre ein, wo die Dichte nur 10.000 pro m³ beträgt) kommt in das Gebiet der Magnetosphäre ein, wo die Dichte nur 10.000 pro m³ beträgt)

⁷⁸ Zu den *Birkeland-Strömen* vgl. b. GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O.,

⁷⁹ Zu den *polaren Elektrojets* vgl. b. GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O.,

⁸⁰ Zum *Inneren der Magnetosphäre* vgl. b. GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O.,

Abb. 5: Diese schematische Veranschaulichung vom Inneren der Magnetosphäre zeigt die großräumigen Stromsysteme.

Grenze, an der die Dichte von ca. 10^6 Teilchen pro m^3 ($1/cm^3$) auf mehrere 10^9 pro m^3 ($10^3/cm^3$) springt. Man hat nun die *Plasmapause*, d. i. die äußere Grenze der *Plasmasphäre*, erreicht.⁸¹ Die Plasmasphäre hat die Form eines Torus (Hohlring, Fahrradschlauch), der sich unterhalb von etwa 60° geomagnetischer Breite zwischen Ionosphäre und Plasmapause über ca. $3 R_e$ ausdehnt. Die Plasmasphäre ist mit kaltem Plasma gefüllt, das aus der Ionosphäre stammt. Da sich die Plasmasphäre starr mit der Erdrotation mitbewegt, wird das an der Plasmapause austretende Plasma sofort von außerhalb vorhandenen, elektrischen Konvektionsfeldern wegtransportiert.

Geht man an der Nachtseite der Magnetosphäre von innen nach außen, so durchstößt man dieselben Plasmagebiete wie auf der Tagseite ca. bis $10 R_e$ Abstand. Erst dort beginnt der eigentliche *Magnetosphärenschweif*⁸². Dieser ist parallel zu den Magnetfeldlinien geschichtet, die hier im Gegensatz zur inneren Magnetosphäre, eher parallel zur Äquatorebene liegen. Nun hat man das Innere von zwei Gebieten der 5 bis $10 R_e$ dicken *Plasmaschicht*⁸³ erreicht, die *Neutralschicht (Stromschicht)* mit einem thermisch hochenergetischen Plasma (*isotrop*) und einer Plasmadichte von $5 \cdot 10^5$ bis 10^6 Teilchen pro m^3 ($1/2/cm^3$ bis $1/cm^3$). Die Magnetfeldstärke ist um und in der neutralen Schicht äußerst klein, das ist möglicherweise die Ursache für Instabilitäten in diesem Bereich.

Geht man nun von dort nord- oder südwärts nach außen, so durchdringt man die Plasmaschicht. Zur Erde hin reicht sie entlang der Magnetfeldlinien bis in die obere Ionosphäre. Diese Teile der Ionosphäre, die mit der Plasmaschicht verbunden sind, sind jene polaren Bereiche, in denen das Polarlicht auftritt und die deshalb als Polarlicht-Zonen bezeichnet werden.

⁸¹ Zu *Plasmasphäre* u. *Plasmapause* vgl. besonders:
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 109

⁸² Zum *Magnetosphärenschweif* vgl. besonders:
HONES, a. a. O., S. 120 ff
KERTZ, a. a. O., S. 388 ff
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 108 ff

⁸³ Zur *Plasmaschicht* vgl. besonders:
HONES, a. a. O., S. 120 ff
GLASSMEIER/SCHOLER, a. a. O., S. 110 f

