

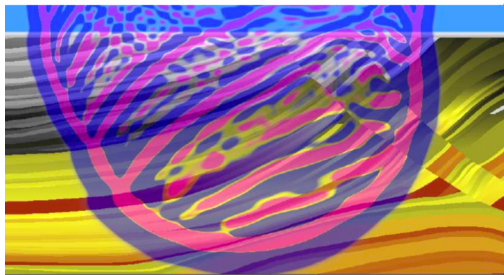
Einführung in die Geophysik I

Das Erdmagnetfeld

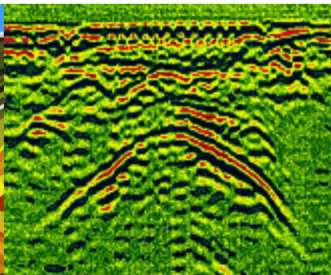
Thomas Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

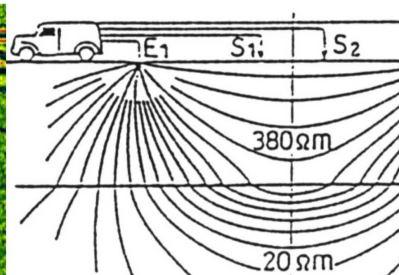
Seismik



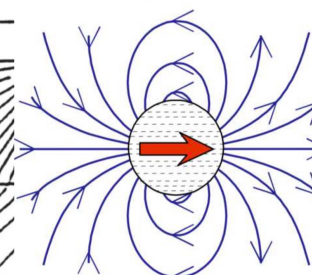
Georadar



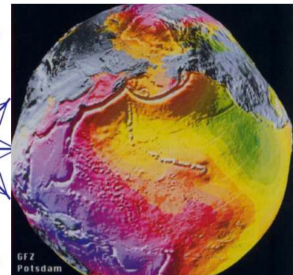
Geoelektrik



Magnetik



Gravimetrie



Gliederung

1. Mathematische Beschreibung
2. Zeitliche Variationen
3. Entstehung
4. Außenfeld

Erdmagnetfeld

Aufteilung

1. Innenfeld

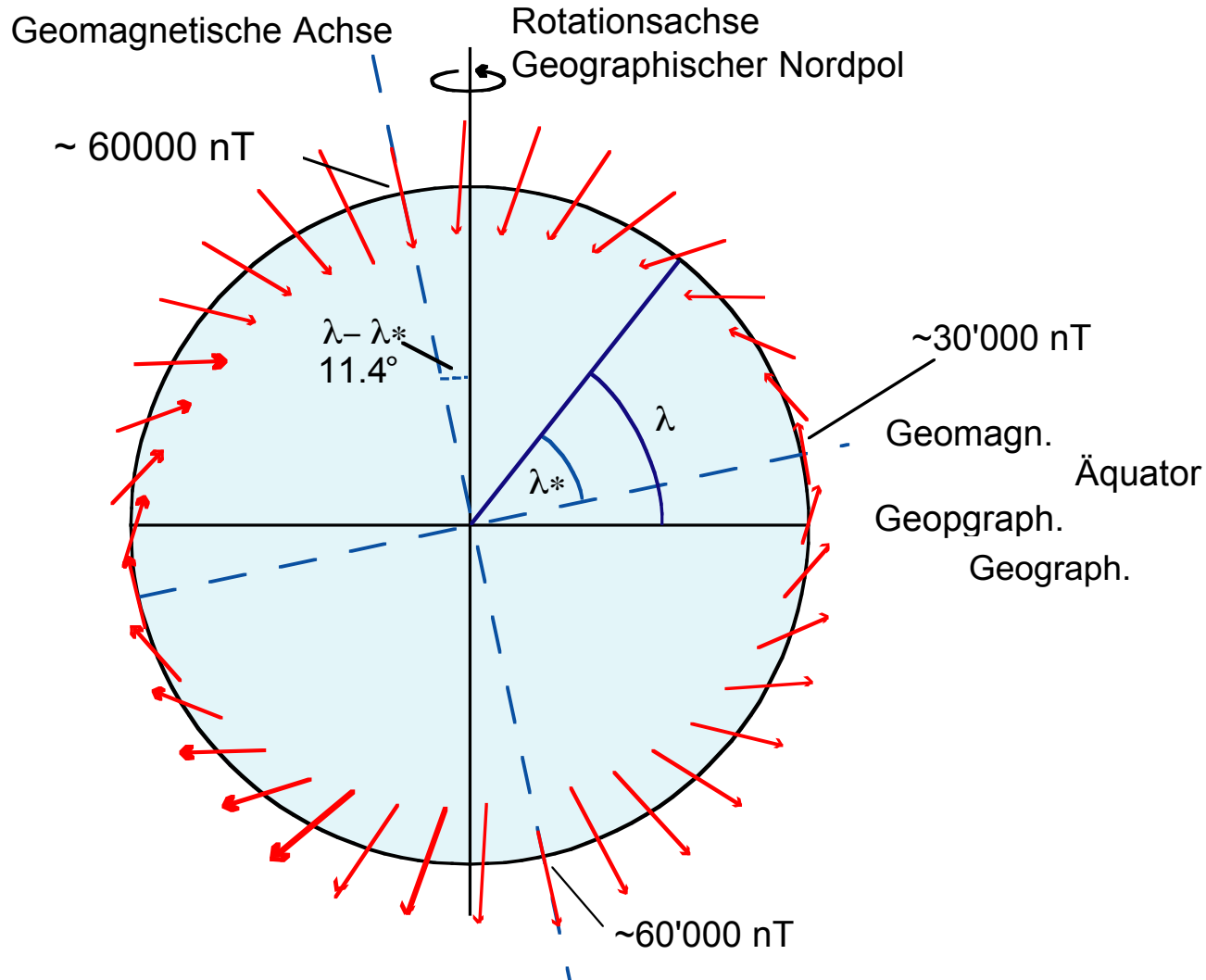
Dipolfeld: 95%

Nicht-Dipol-Feld ca. 5%

2. Außenfeld (Weltraum)

3. Lokale Anomalien (Magnetik – nächste Woche)

Das Dipolfeld



Beschreibung des Dipolfeldes

Das magnetische Potenzial W an einem Punkt r kann als die Arbeit W definiert werden, welche gegen das Magnetfeld eines Pols der Polstärke p aufgebracht werden muss, um einen Einheitspol von r gegen das Feld nach unendlich zu verschieben.

$$W = - \int_r^{\infty} \mathbf{B} \, dr$$

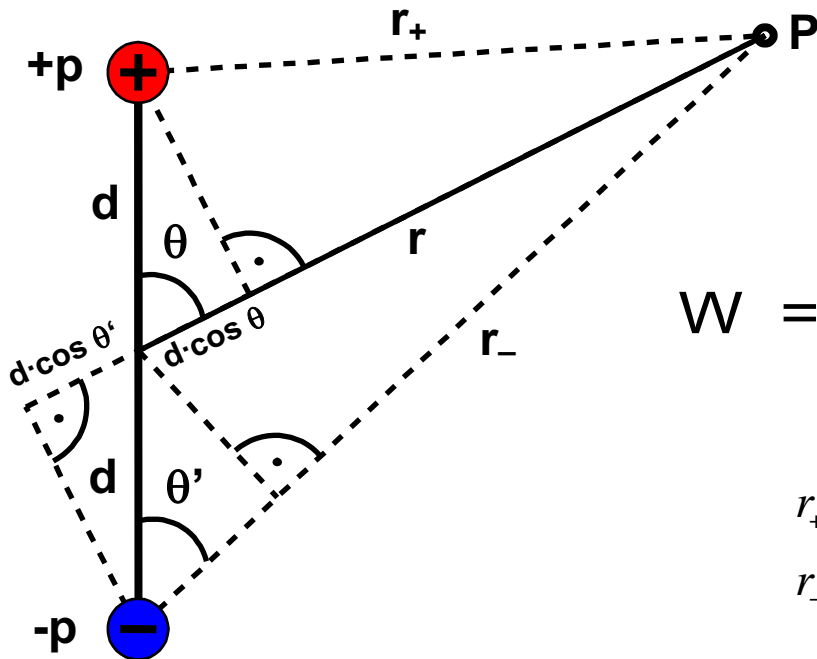
Im Falle eines einzelnen Monopols ist das Potential

$$W = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{p}{r}$$

Das Magnetfeld $\mathbf{B}$ ist der Gradient des Potential W

$$\vec{B} = -grad(W)$$

Das Potential eines magnetischen Dipols



Am Punkt P besteht das Potential (W) aus einem Beitrag von jedem der beiden Pole

$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{p}{r_+} - \frac{p}{r_-} \right\} = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left\{ \frac{r_- - r_+}{r_- r_+} \right\}$$

$$r_+^2 = r^2 + d^2 - 2dr \cos \theta \quad r_+ \approx r - d \cos \theta$$

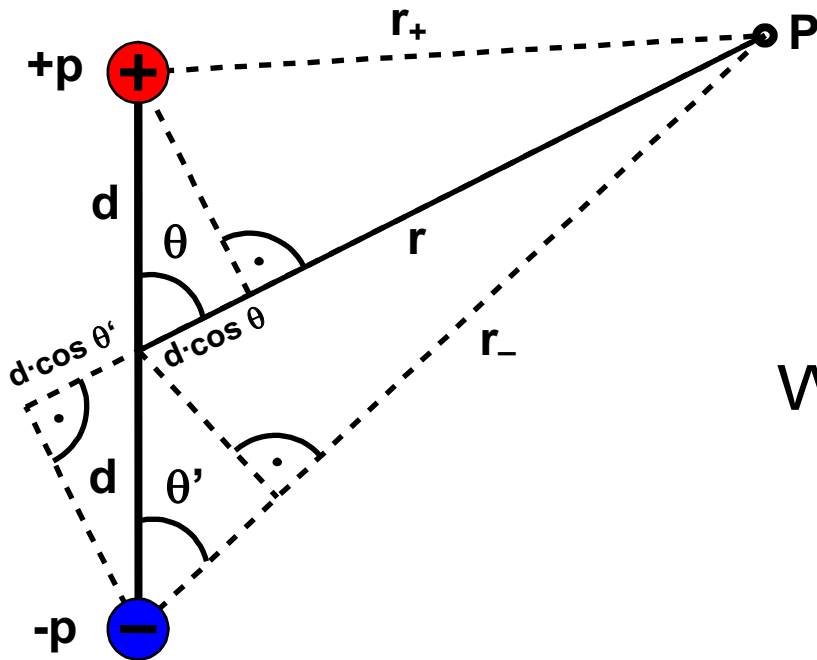
$$r_-^2 = r^2 + d^2 + 2dr \cos \theta \quad r_- \approx r + d \cos \theta'$$

für $d \ll r$, $\theta' \rightarrow \theta$, und $\left(\frac{d}{r}\right)^2$ vernachlässigbar und somit

$$r_- - r_+ \approx d(\cos \theta' + \cos \theta) \approx 2d \cos \theta$$

$$r_+ r_- \approx r^2 - d^2 \cos^2 \theta \approx r^2$$

Das Potential eines magnetischen Dipols

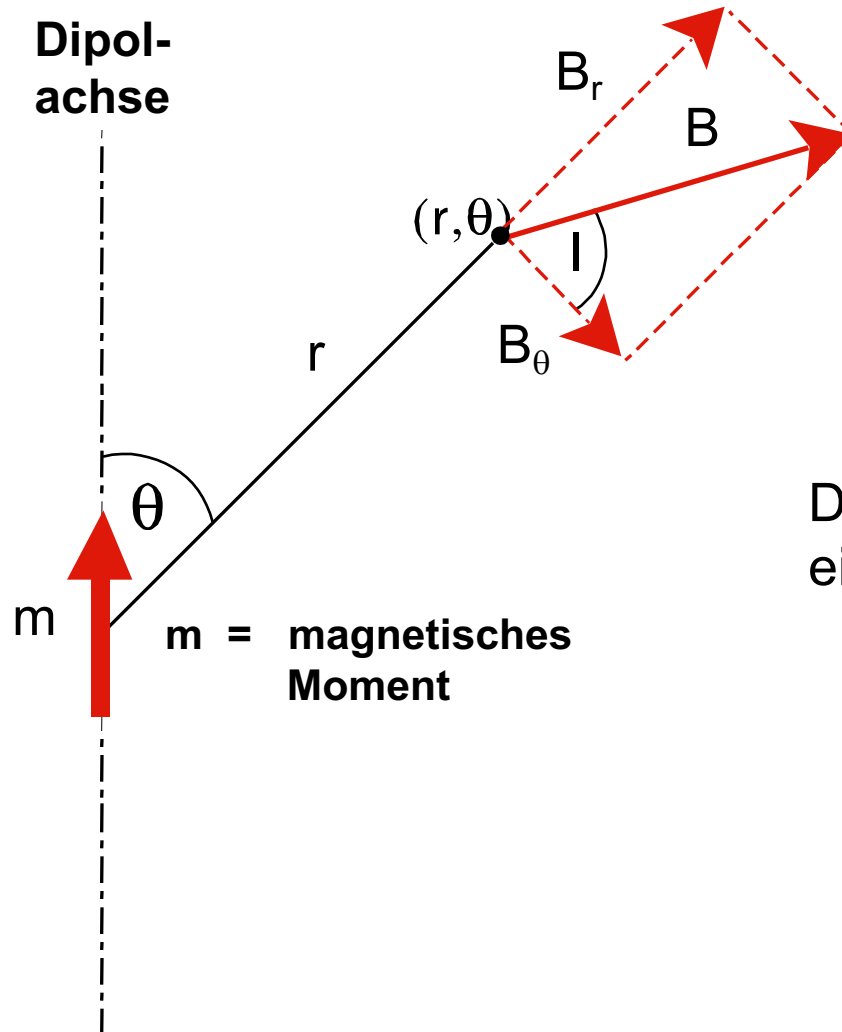


$$W = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(2pd) \cos \theta}{r^2}$$

$$= \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2}$$

$m=2dp$ ist das magnetische Moment des Dipols

Das Potential eines magnetischen Dipols



Potential des Dipols:

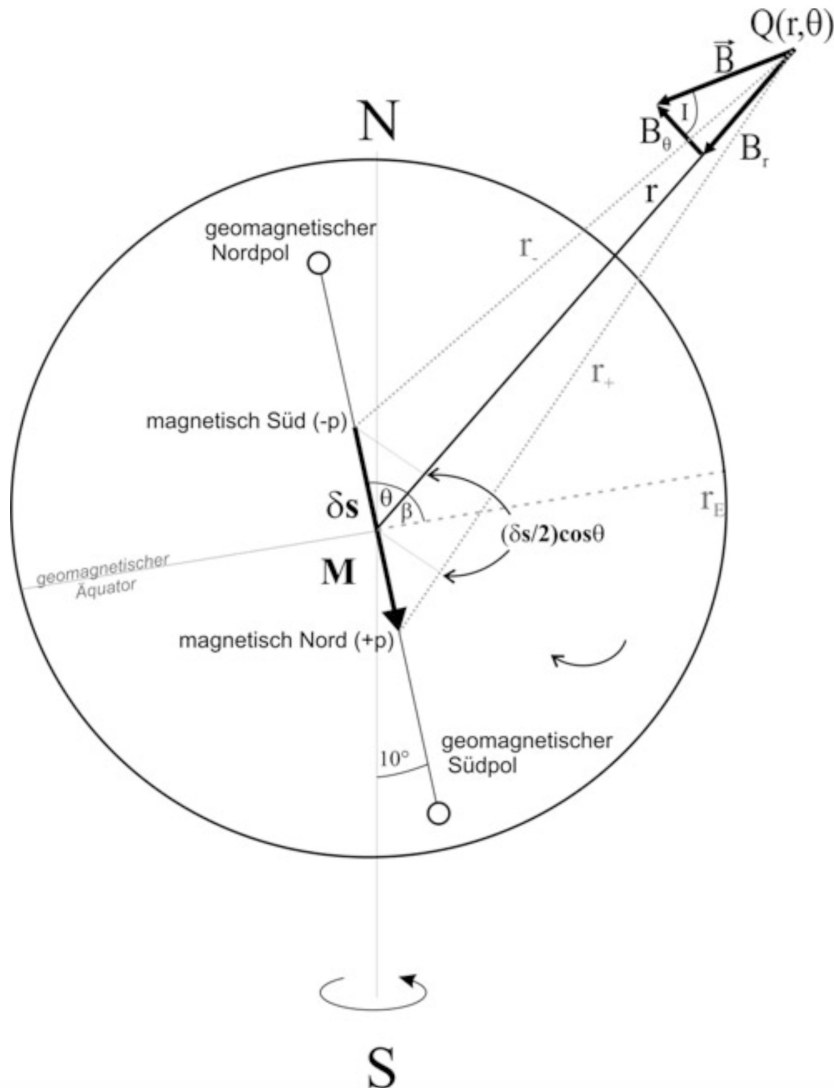
$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \cos\theta}{r^2}$$

Das Feld hat eine radiale und eine transversale Komponente:

$$B_r = -\frac{dW}{dr} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 m \cos\theta}{r^3}$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{dW}{d\theta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \sin\theta}{r^3}$$

Dipolfeld auf einer Kugel



Annäherung des Erdmagnetfelds durch einen zentralen magnetischen Dipol mit magnetischem Moment M ((Theta,Beta)=geomagnetische Polhöhe und Breite)

$$(B_r := B_z, B_h := B_\theta)$$

$$\theta = 0^\circ \text{ und } \beta = 90^\circ : B_z^{\text{Pol}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{r^3} \text{ und } B_h^{\text{Pol}} = 0 ;$$

$$\theta = 90^\circ \text{ und } \beta = 0^\circ : B_z^{\text{Äq.}} = 0 \text{ und } B_h^{\text{Äq.}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} .$$

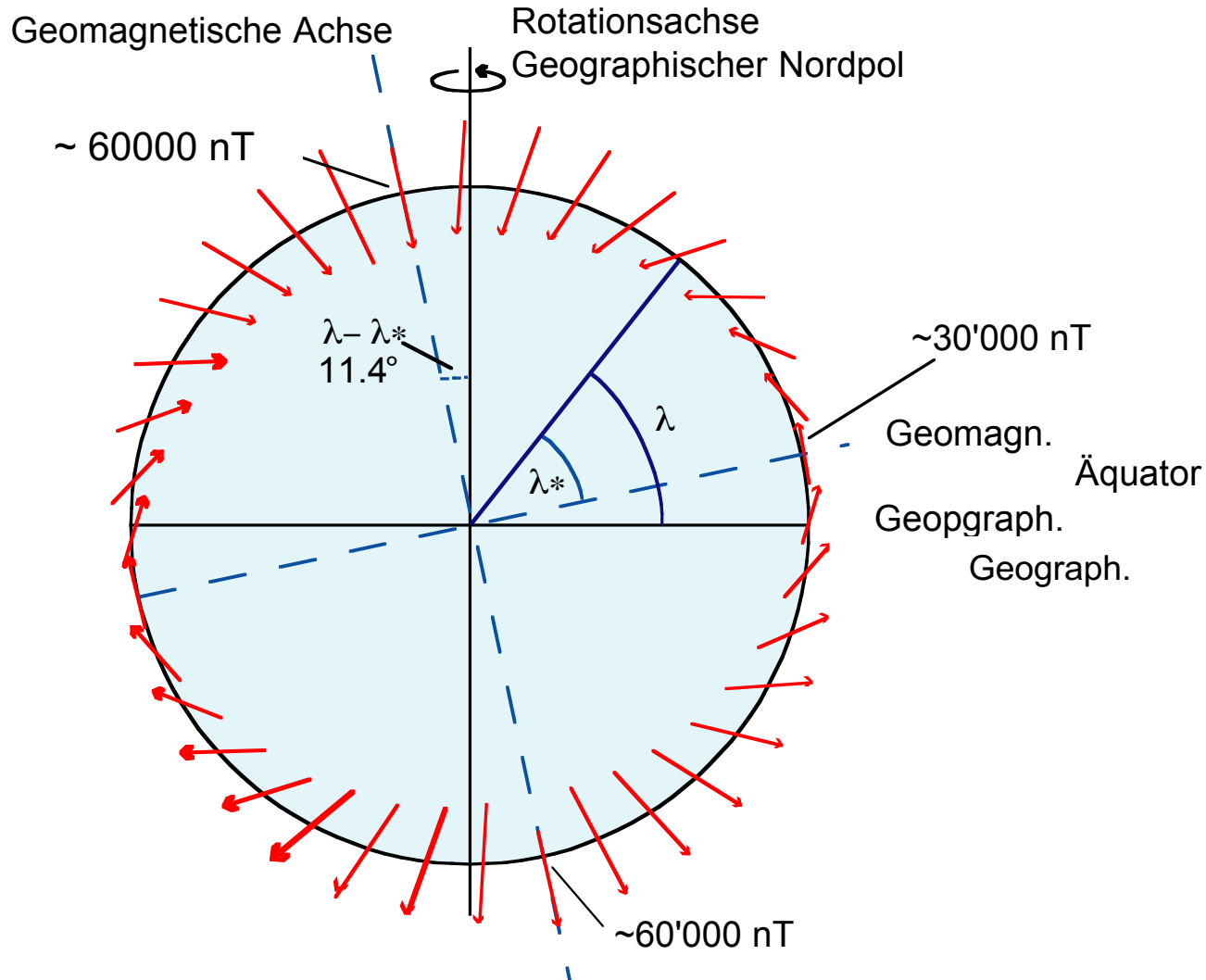
Magnetfeldstärken für eine Kugel

$$\begin{aligned} B_z^{\text{Pol}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{r_E^3} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \frac{7,75 \times 10^{22} \text{A m}^2}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{m}^3} \\ &= \frac{15,5 \times 10^{15} \text{Vs m}}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{m}^3} = \frac{15,5 \times 10^{15} \text{Vs}}{2,58 \times 10^{20} \text{m}^2} \\ &= 6,0078 \times 10^{-5} \text{T} = 60,078 \mu\text{T} = 60\,078 \text{nT} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_h^{\text{Äq.}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r_E^3} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{4\pi} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \frac{7,75 \times 10^{22} \text{A m}^2}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{m}^3} \\ &= \frac{7,75 \times 10^{15} \text{Vs m}}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{m}^3} = \frac{7,75 \times 10^{15} \text{Vs}}{2,58 \times 10^{20} \text{m}^2} \\ &= 3,0039 \times 10^{-5} \text{T} = 30,039 \mu\text{T} = 30\,039 \text{nT} . \end{aligned}$$

(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Das Dipolfeld

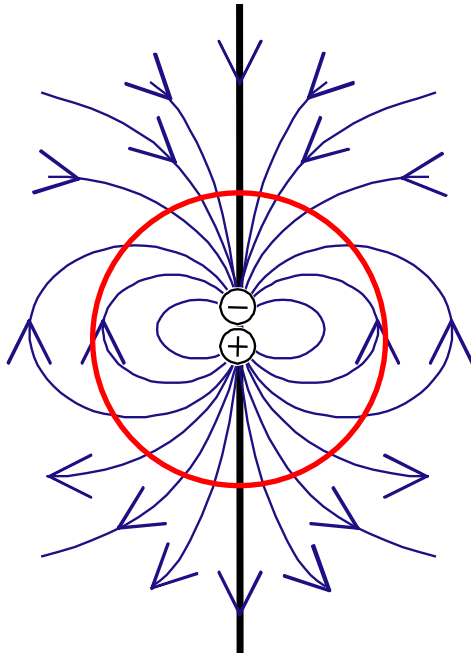


- Mathematische Beschreibung
 - Dipolfeld
 - **Nicht-Dipolfeld**
- Zeitliche Variationen
- Entstehung
- Außenfeld

Entwicklung des Feldes

Ordnung

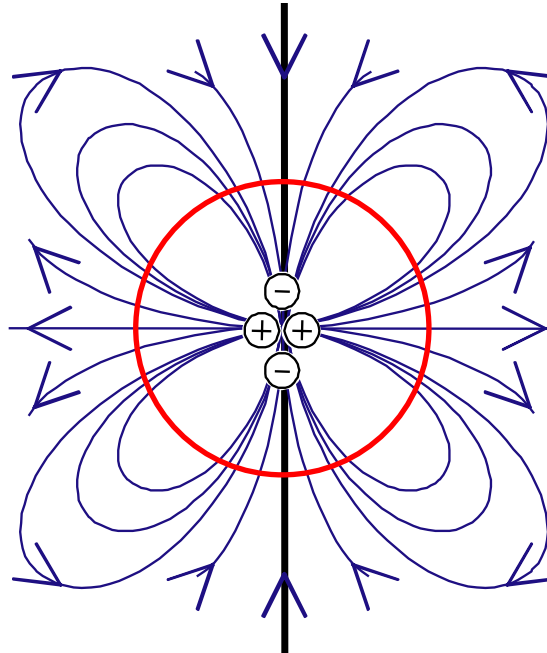
$l=1$



a) Dipol

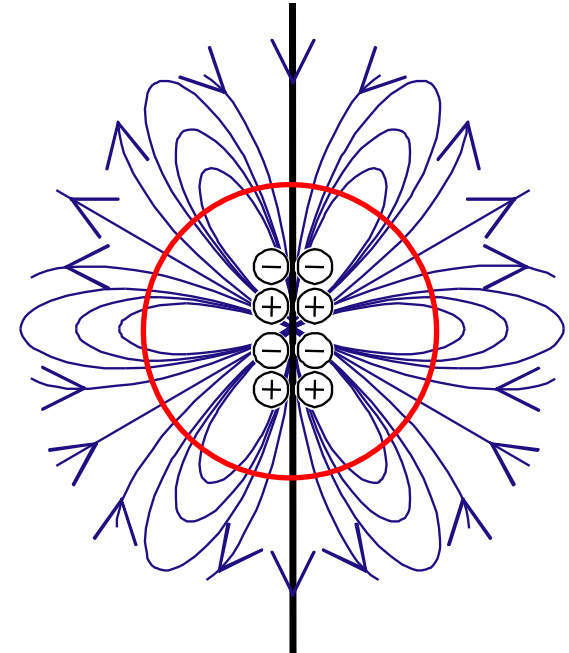
das Dipolfeld $\approx 95 \%$

$l=2$



b) Quadrupol

$l=3$



c) Oktupol

← das Nichtdipol-Feld (NDF) $\approx 5 \%$ des Totalfeldes →

Entwicklung des Feldes

B: Magnetfeld, **V:** Potential

$$\mathbf{B} = -\nabla V$$

$$V(r, \theta, \lambda) = r_E \sum_{\ell=0}^{\infty} \left\{ (r/r_E)^{\ell} T_{\ell}^e + (r_E/r)^{\ell+1} T_{\ell}^i \right\} = V_e + V_i$$

mit den wie folgt definierten, auf äußere und innere Quellen bezogenen Termen T_{ℓ}^e und T_{ℓ}^i :

$$T_{\ell}^e = P_{\ell}^m(\cos \theta) \left(g_{\ell}^{m,e} \cos m\lambda + h_{\ell}^{m,e} \sin m\lambda \right) ;$$

$$T_{\ell}^i = P_{\ell}^m(\cos \theta) \left(g_{\ell}^{m,i} \cos m\lambda + h_{\ell}^{m,i} \sin m\lambda \right) ; \text{ mit:}$$

P: Kugelfunktionen, g,h: Gauß-Koeffizienten

Deklination und Inklinaton

Die geomagnetischen Feldelemente

Das Feld kann mit kartesischen Koordinaten beschrieben werden:
X (Nord), Y (Ost), Z (vertikal unten)

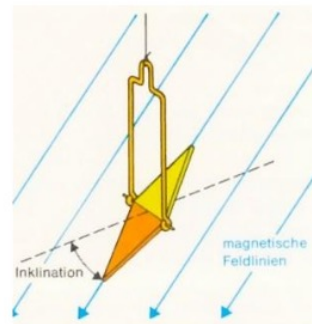
oder mit Kugelkoordinaten

D (Deklination), I (Inklination),
T (Totalintensität).

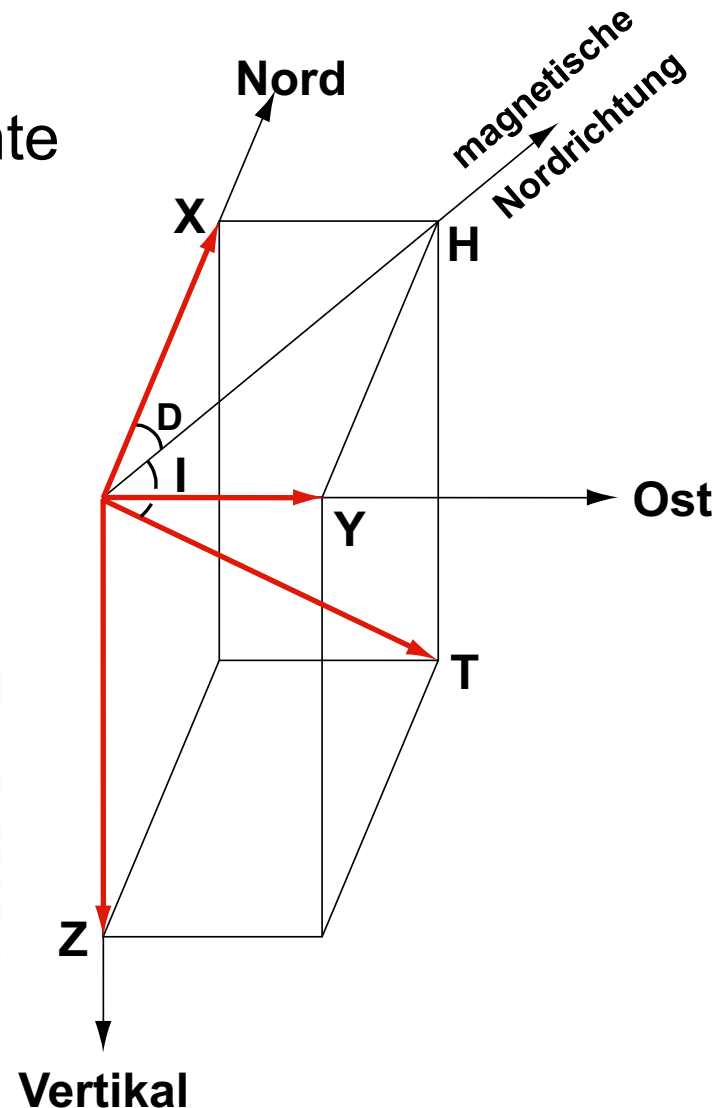
$$\tan D = Y/X$$

$$\tan I = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$T = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

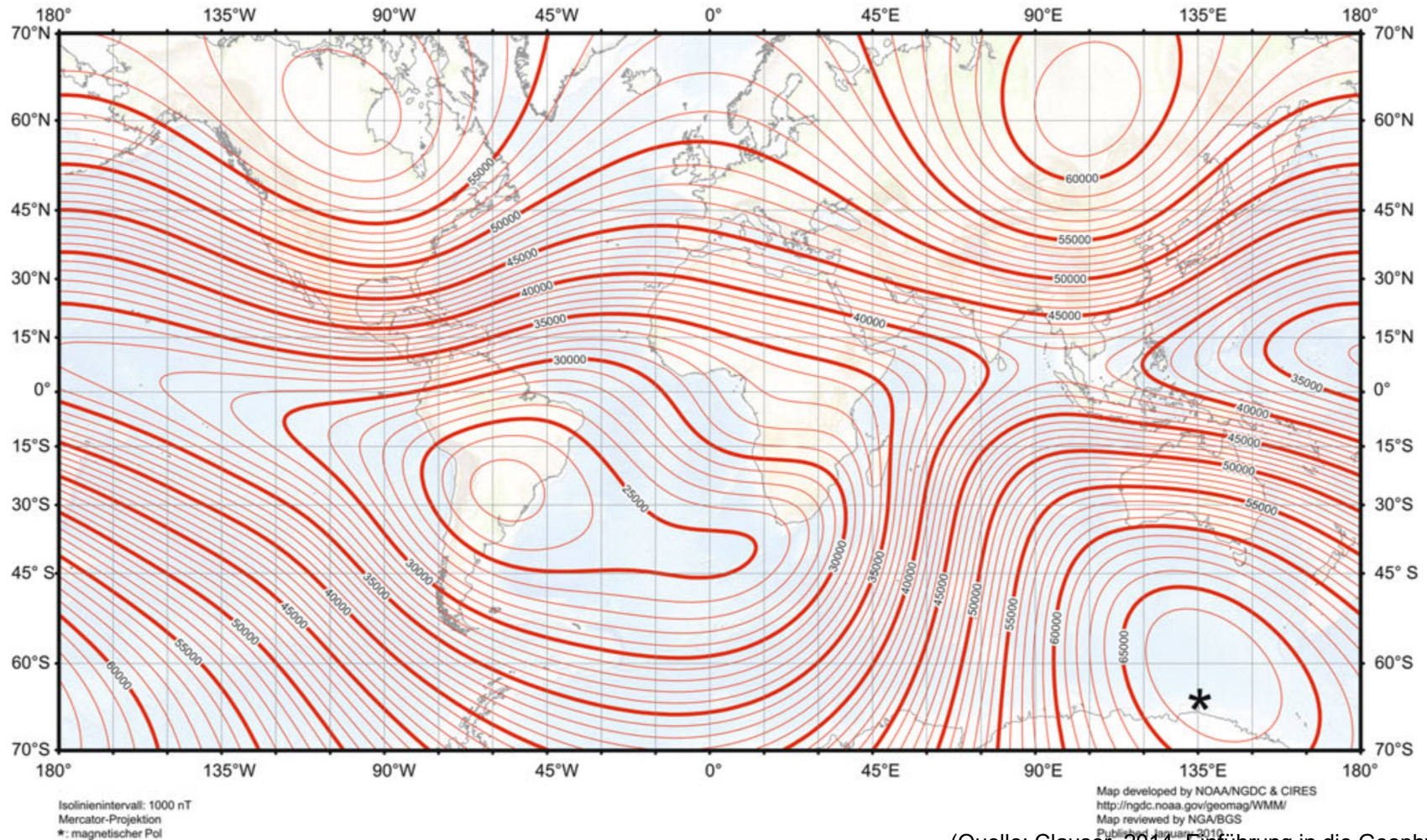


Stolle,
2015



Totalintensität 2010

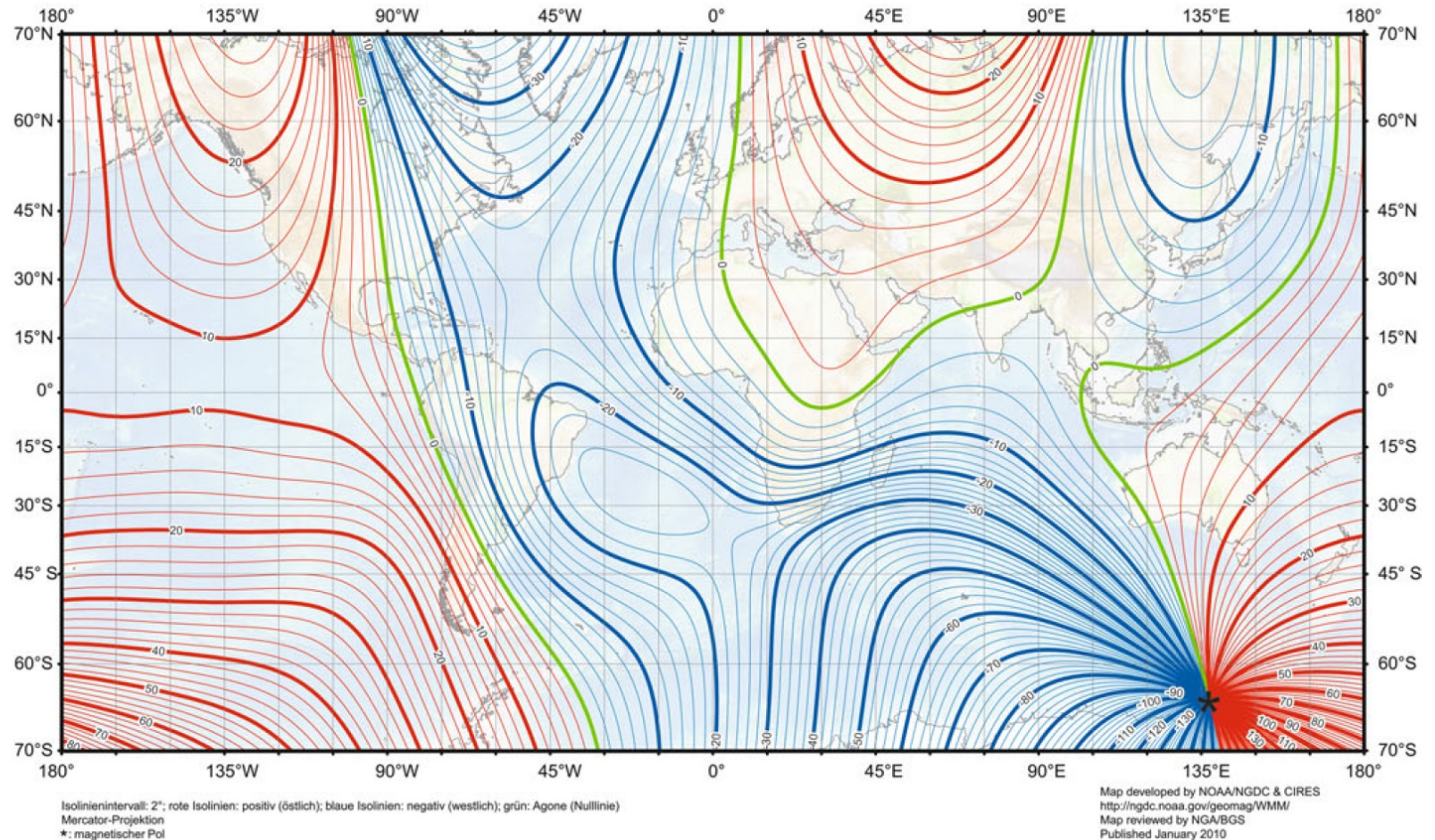
US/UK Globales Magnetfeldmodell -- Epoche 2010.0
Magnetfeldstärke B



(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

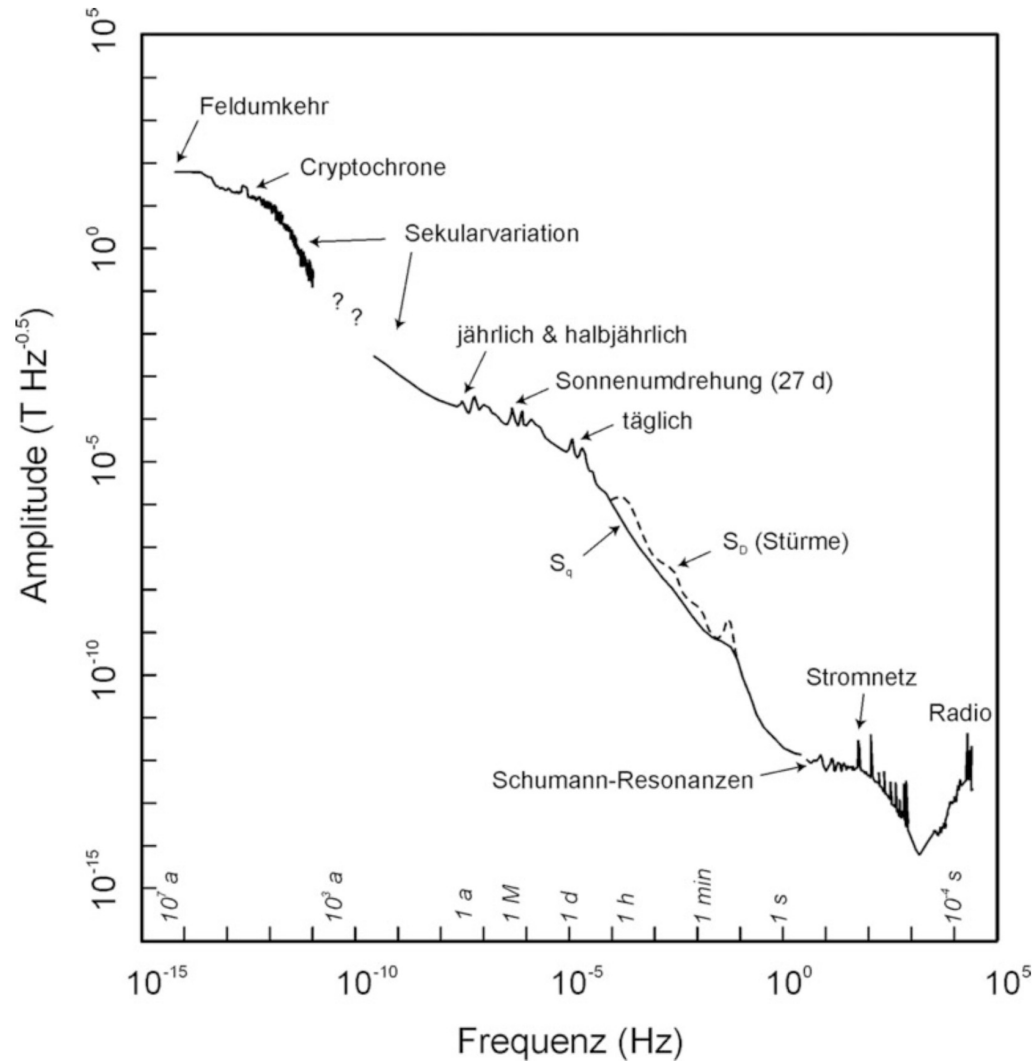
Deklination 2010

US/UK Globales Magnetfeldmodell -- Epoche 2010.0
Deklination D



- Mathematische Beschreibung
 - Dipolfeld
 - Nicht-Dipolfeld
- **Zeitliche Variationen**
- Entstehung
- Außenfeld

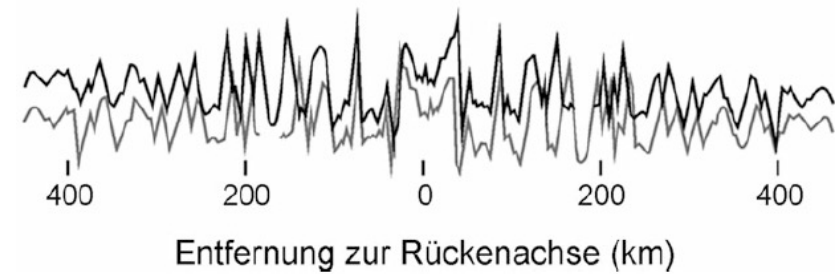
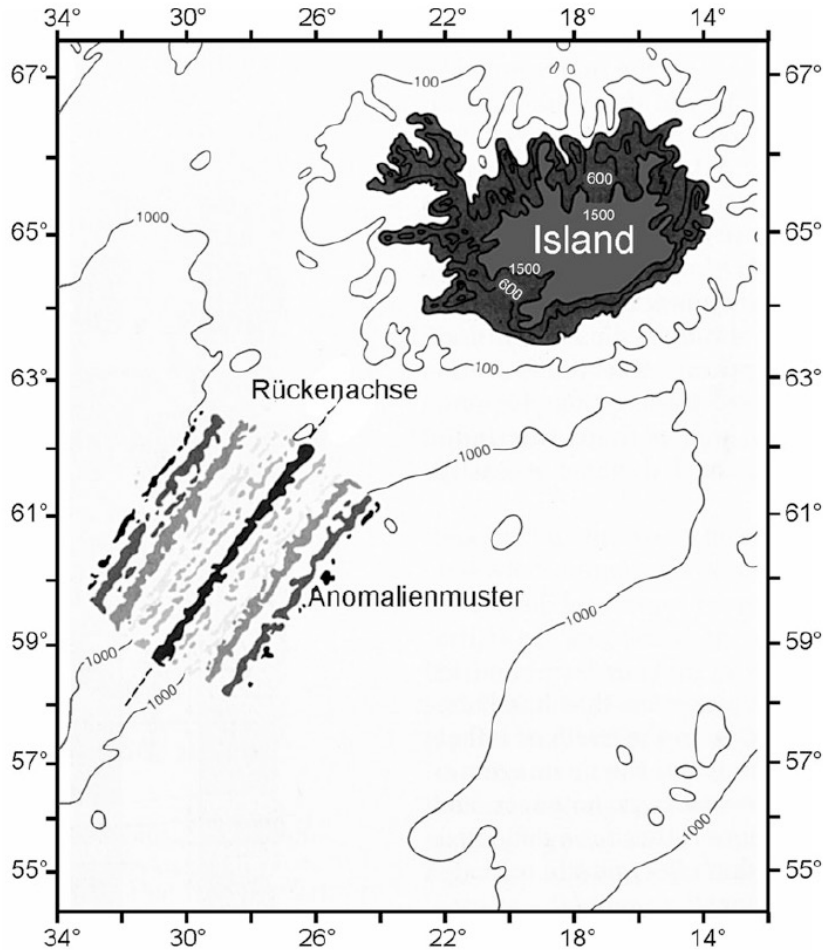
Zeitliche Variationen



Breitbandiges
Amplitudenspektrum
geomagnetischer
Variationen mit
Bezeichnung der auf
unterschiedlichen
Zeitskalen
dominierenden
Prozesse

(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Feldumkehr



Die Polumkehr des Erdmagnetfeldes ist beobachtbar als magnetische Streifenmuster entlang der mittelozeanischen Rücken

Polwanderung

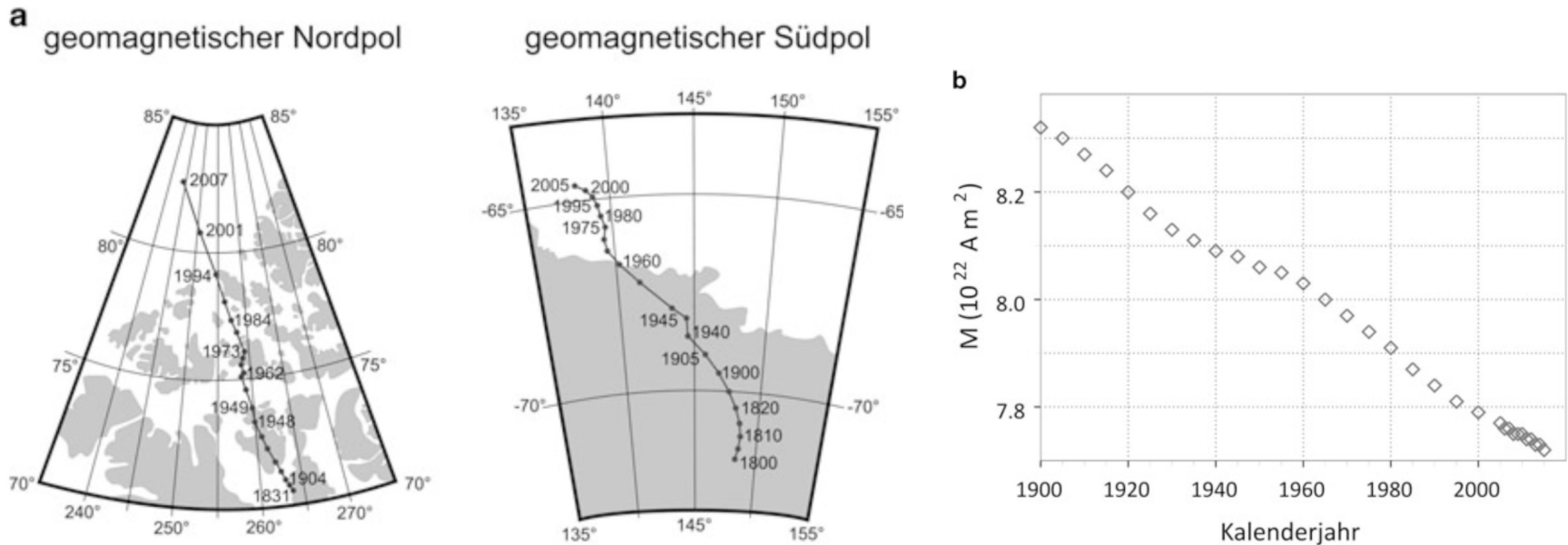


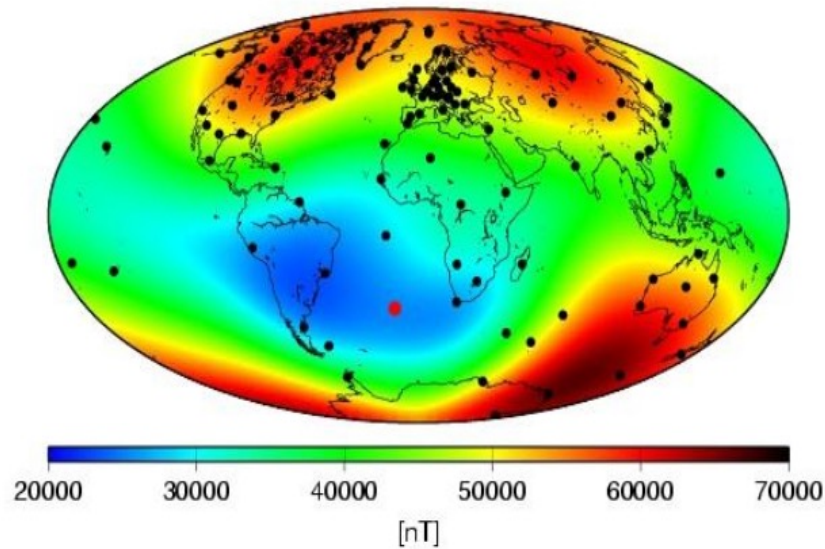
Abb. 5.7 Säkularvariation des Erdmagnetfelds: **a** Wanderung des magnetischen Nord- und Südpols von 1820 bzw. 1900 bis 2005. Derzeit wandern die Pole etwa 40 km pro Jahr in nordwestlicher Richtung (Daten mit Genehmigung des World Data Center for Geomagnetism, Kyoto: WDC 2010); **b** Abnahme des geomagnetischen Dipolmoments M im 20. Jahrhundert um ca. $5 \times 10^{21} \text{ A m}^2$ (Daten: WDC 2010)

Ursache: zeitliche Veränderungen der Konvektion im äußeren Kern

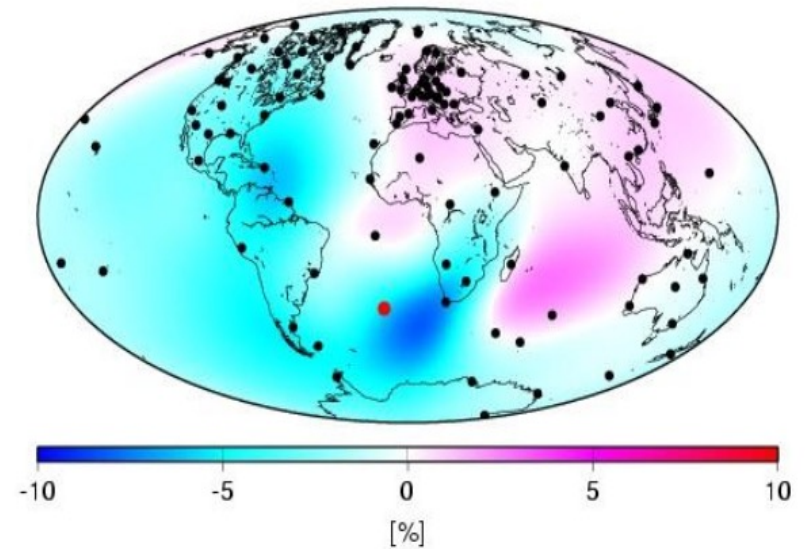
(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Säkularvariation

Feldstärke in nT



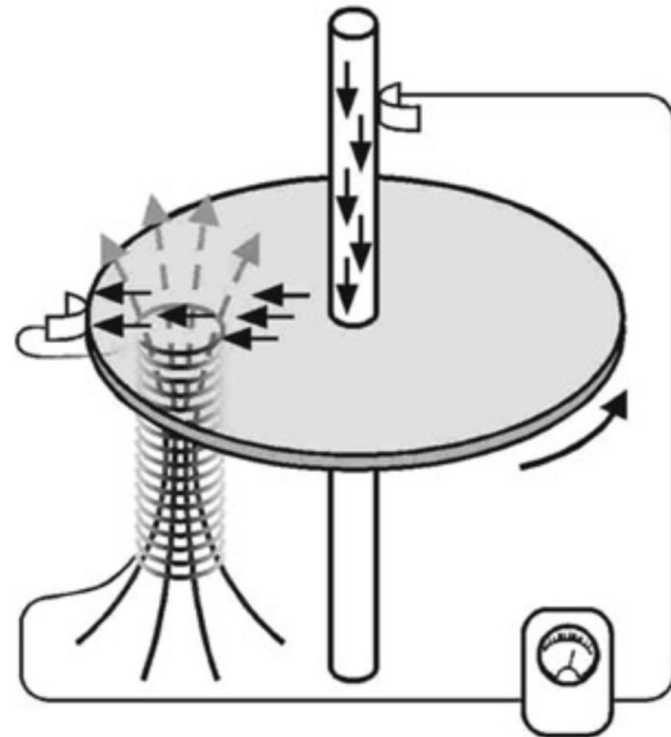
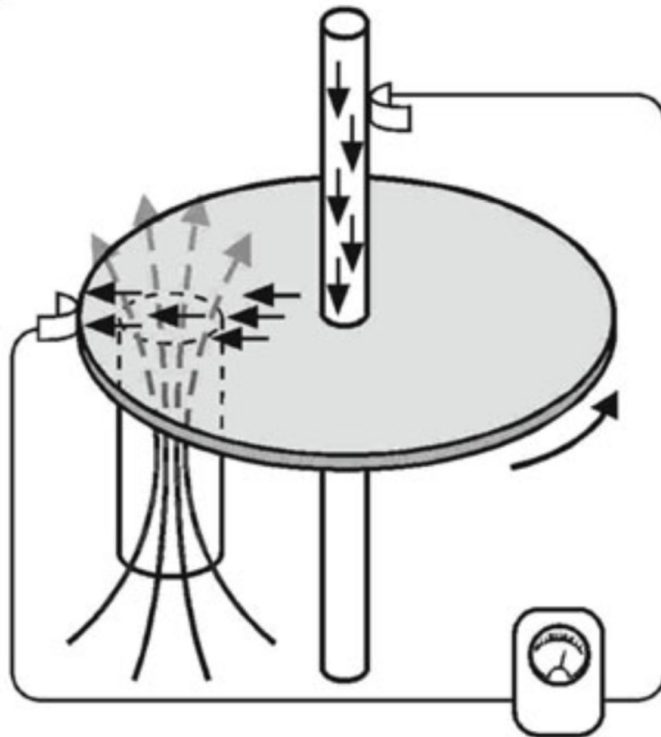
Variation der letzten 20 Jahre in %



- Mathematische Beschreibung
 - Dipolfeld
 - Nicht-Dipolfeld
- Zeitliche Variationen
- **Entstehung**
- Außenfeld

Entstehung des Innenfeldes

a

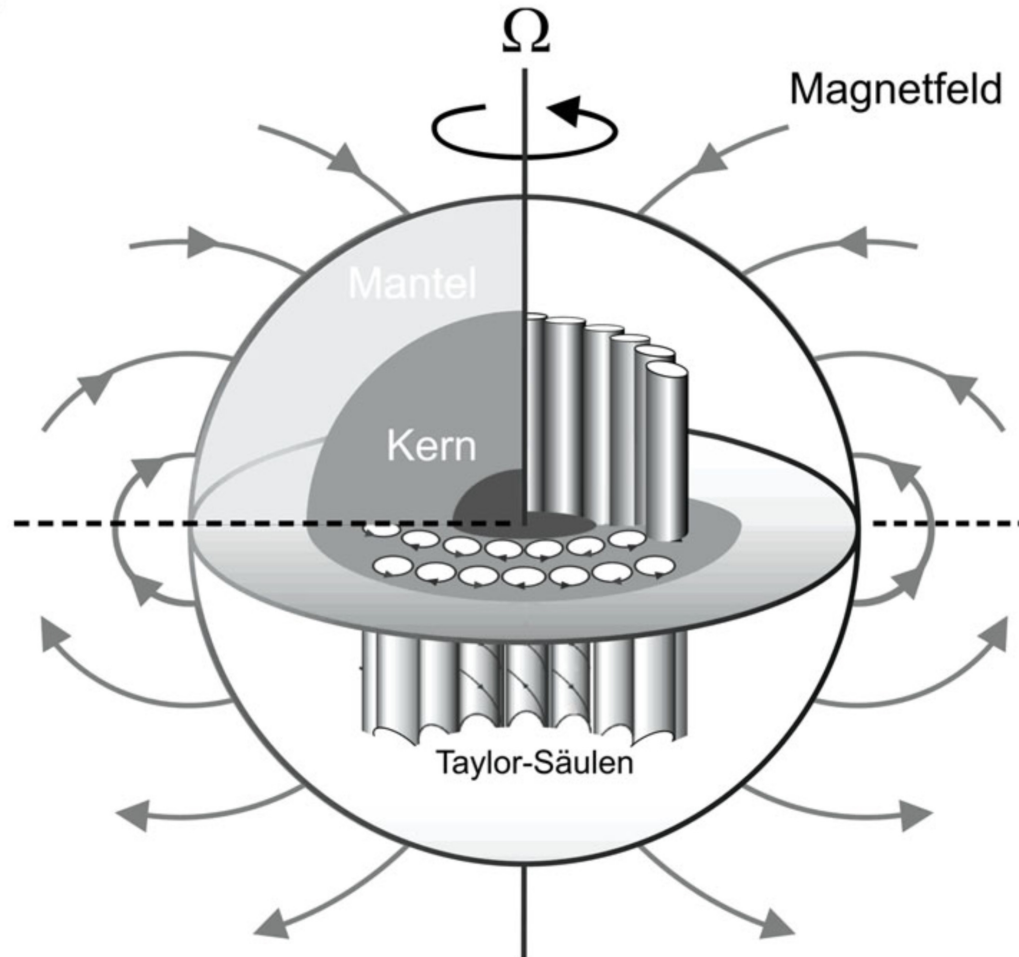


Prinzip des selbst-erregten Geodynamos: Ein Dynamo erzeugt Strom, wenn sich die Kupferscheibe im Feld des Stabmagneten bewegt (links). Wird dieser durch eine Magnetspule ersetzt und der erzeugte Strom in die Spule eingespeist, so bleibt das selbsterregte Magnetfeld erhalten, solange sich die Scheibe dreht (rechts). Das Erdmagnetfeld beruht auf dem Prinzip des selbsterregten Dynamos, allerdings auf sehr viel kompliziertere Weise

(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Modell zur Entstehung des Innenfeldes

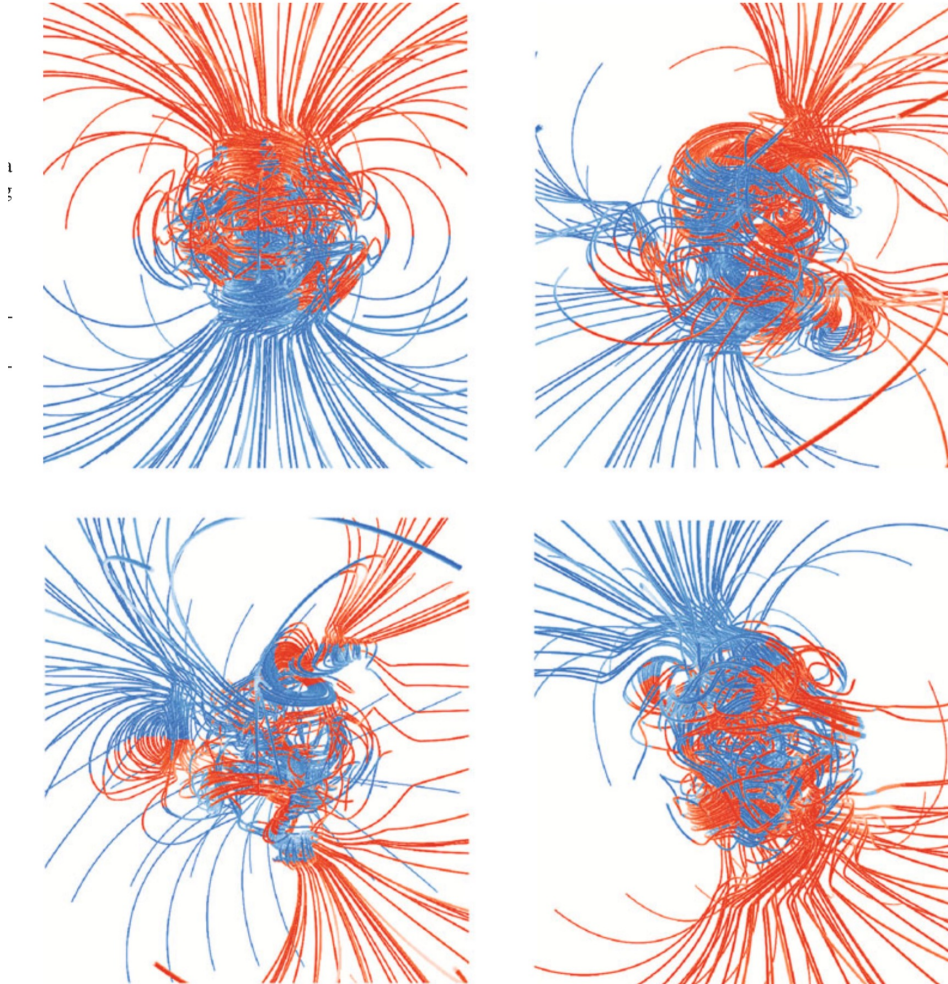
a



Ein Modell wurde im Labor-Geodynamo am Forschungszentrum Karlsruhe nachgebildet. Dargestellt ist das Funktionsprinzip: das Bild zeigt einen vereinfachten Aufbau der Erde aus festem und flüssigem Kern sowie plastischem Mantel, der bis zur Kruste reicht (von innen nach außen). Im flüssigen Kern können sich durch Temperaturunterschiede Konvektionszellen ausbilden. Die aufgrund der Erdumdrehung zusätzlich wirkende Coriolis-Kraft verursacht eine Ablenkung der Konvektionspfade nach rechts bzw. links auf der Nord- bzw. Südhalbkugel. Dadurch entstehen die dargestellten spiralförmigen Bewegungen in den sogenannten Taylor-Säulen, durch die ein stabiles Magnetfeld erzeugt wird.

(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Entstehung des Innenfeldes



Erdmagnetfeld
aus 3D magnetohydrodynamischen
Modellrechnungen von G. A.
Glatzmaier (University of Ca-
lifornia Santa Cruz) und P. H. Roberts
(University of California Los Angeles)
Rote Feldlinien sind nach innen
gerichtet, blaue nach außen. Die
Rotationsachse der Modellerde ist
vertikal und verläuft durch das
Zentrum. Von links nach rechts:
Magnetfeld im „heutigen“ Zustand
und 500 Jahre vor einer
Feldumkehr. Unten (von links nach
rechts): Magnetfeld in der Mitte der
Feldumkehr und 500 Jahre danach

(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

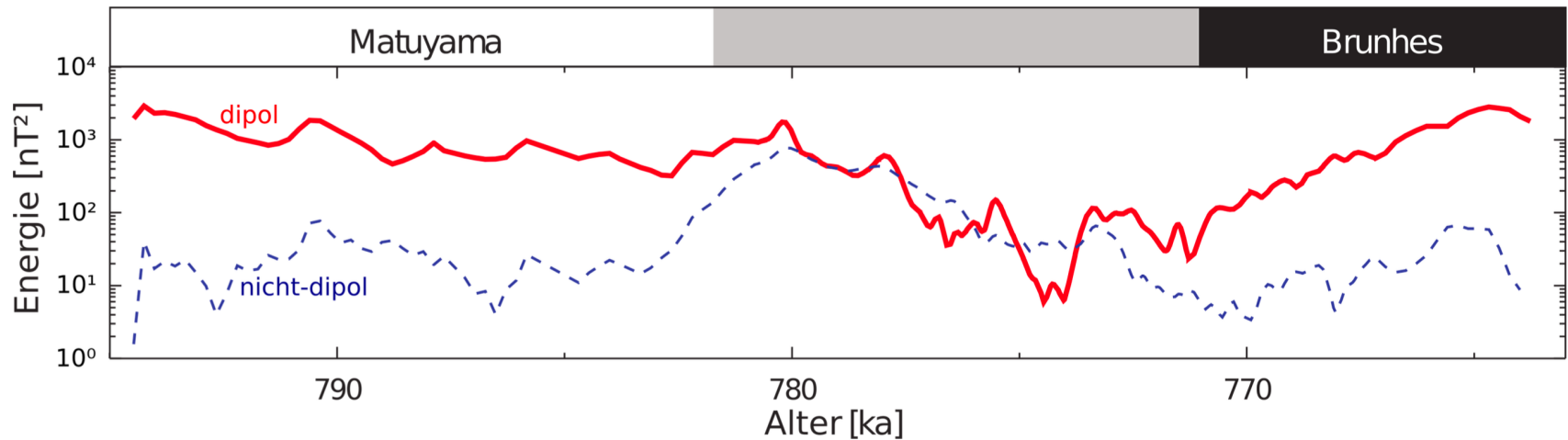
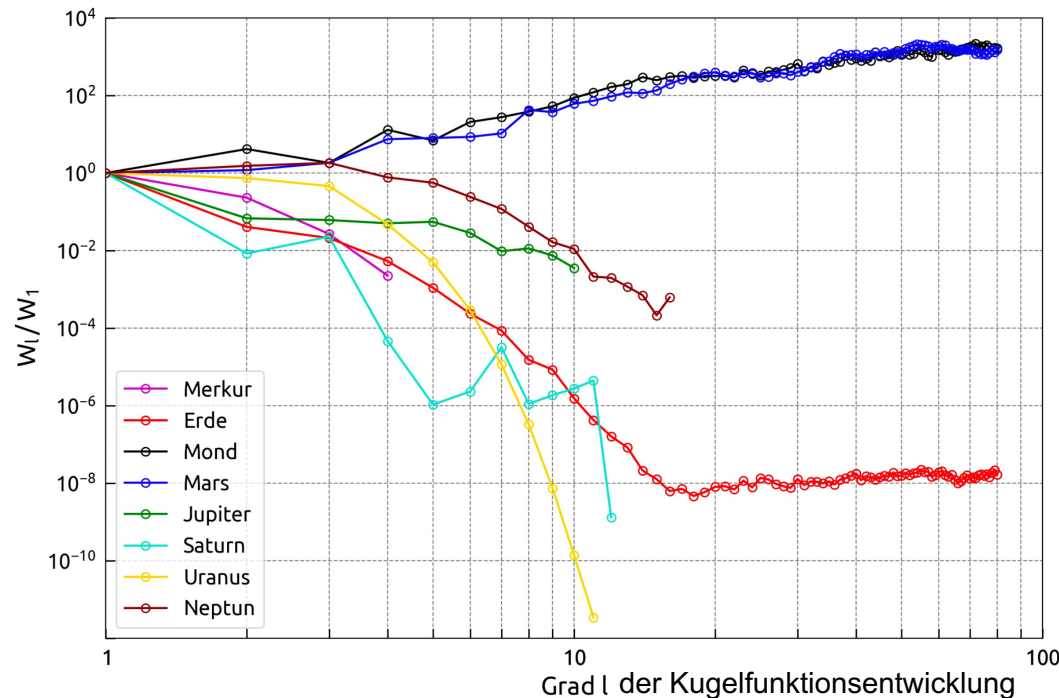


Abbildung 2: Zeitliche Änderung der magnetischen Energie des Dipolanteils (durchgezogene Linie) und der Nicht-Dipolanteile (gestrichelt), dargestellt anhand der Mauersberger-Koeffizienten an der Erdoberfläche während des Matuyama-Brunhes Reversals vor 780.000 Jahren (nach Leonhardt & Fabian, 2007). Graphik: Roman Leonhardt

Magnetfeld der Planeten

Aus Weltraumbeobachtungen



Globale Dipolfelder bei Merkur, Jupiter, Saturn, Uranus Neptun. Ursache tief im Inneren. Mechanismus unbekannt.

Mars und Mond keine globalen Felder, weisen aber starke Anomalien auf, die in der Kruste entstehen.

Venus: kein globales Feld

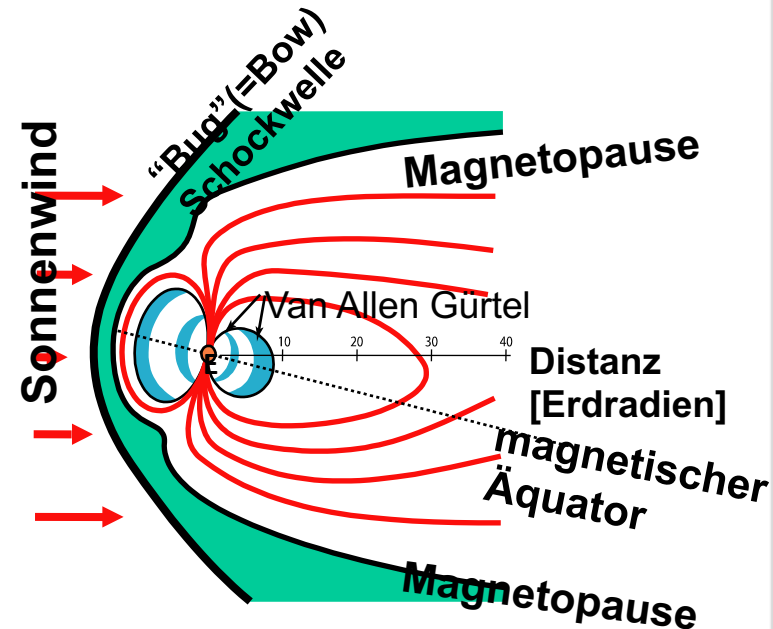
Abbildung 1: Mauersberger-Spektren der internen Anteile der Magnetfelder verschiedener planetarer Körper in unserem Sonnensystem. Die spektralen Werte sind auf die jeweiligen Dipolmomente normalisiert (nach Glassmeier & Heyner, 2021). Graphik: Patrik Kohlhey, TU Braunschweig

- Mathematische Beschreibung
 - Dipolfeld
 - Nicht-Dipolfeld
- Zeitliche Variationen
- Entstehung
- **Außenfeld**

Das Außenfeld

Das Außenfeld: Magnetosphäre

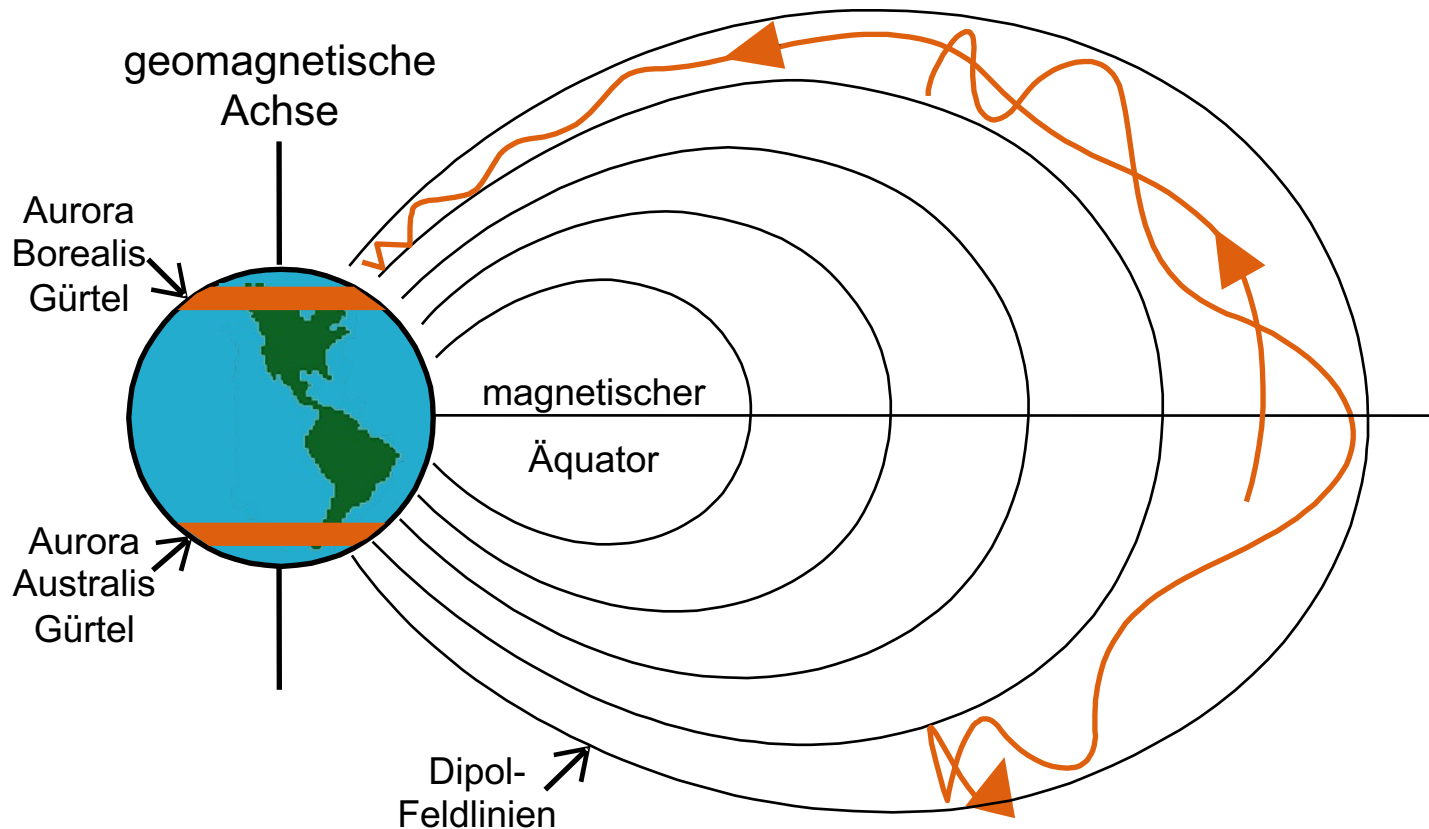
- Der „Sonnenwind“ besteht aus elektrisch geladenen Teilchen (Elektronen, Protonen).
- Geschwindigkeit relativ zur Erde ≈ 400 m/s.
- Bei dieser Ultraschallgeschwindigkeit bildet sich eine Schock-Welle auf der sonnennahen Seite der Erde (= Magnetopause)
- Die Teilchen des Sonnenwindes (wie elektrischer Strom) verursachen Magnetfelder
- Das Erdmagnetfeld wird auf der Tages-Seite verstärkt und auf der Nacht-Seite abgeschwächt



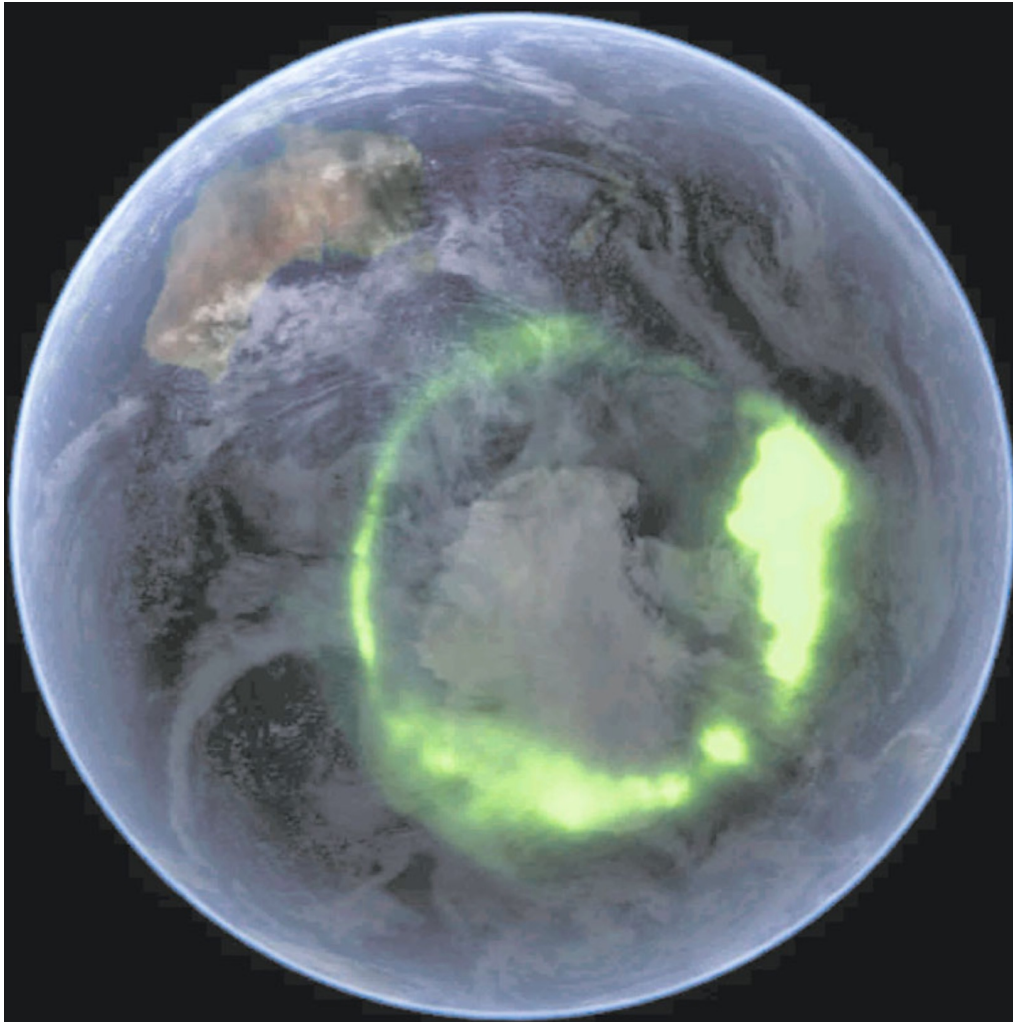
Das Außenfeld: Van Allen Gürtel (Höhe: 2000 – 20000 km)

- Ionen des Sonnenwinds (sowie aus der Ionosphäre) werden im Erdmagnetfeld gefangen.
- Die Ionen werden gezwungen, entlang magnetischer Feldlinien schraubenartig von Pol zu Pol zu wandern.
- Es bilden sich „Gürtel“ mit intensiver Strahlung: Van Allen Gürtel
 - innerer Gürtel: $r = 1.3 - 1.7 R$ (2'000 – 5'000 km Höhe)
 - äusserer Gürtel: $r = 3.2 - 4.2 R$ (13'000 – 20'000 km)
 - Die magnetischen Effekte auf der Erdoberfläche sind aufgrund der grossen Entfernung gering.

Die Bewegung der eingefangenen geladenen Partikel im erdmagnetischen Feld



Das Außenfeld



Südliches Polarlicht (aurora australis), aufgenommen vom NASA IMAGE Satelliten am 11. September 2005, vier Tage nach der extrem starken Sonneneruption und dem damit verbundenen starken Plasmafluss in Richtung Erde;

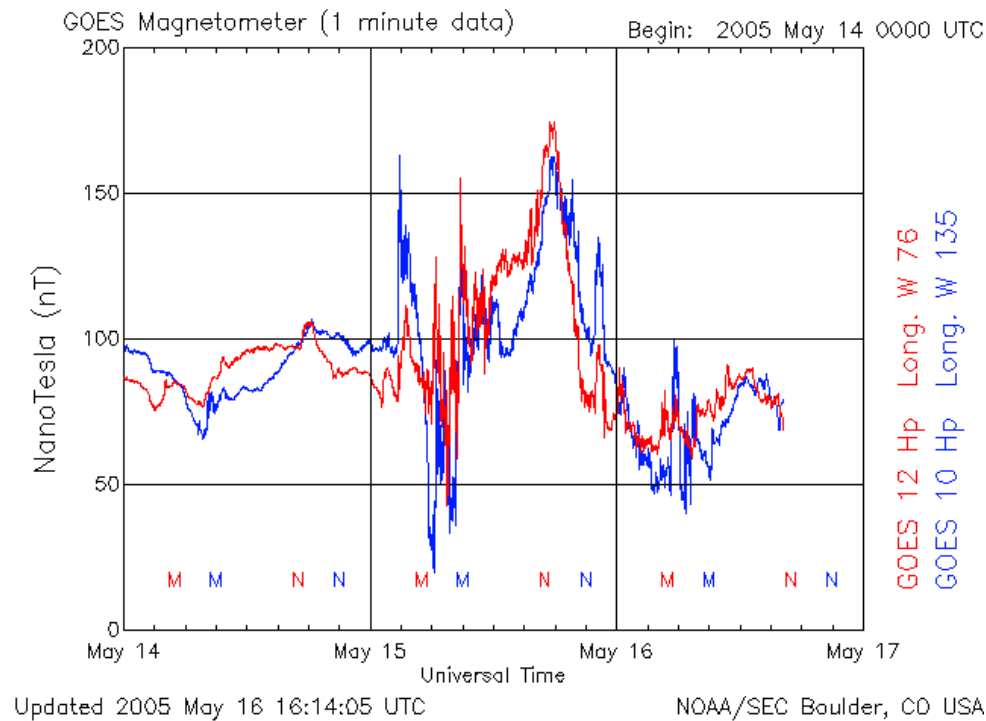
(Quelle: Clauser, 2014, Einführung in die Geophysik)

Variation des Erdmagnetfeldes: S_D

- Sonnenflecken lösen immense Strahlung (+ Sonnenwind) aus >>> Verstärkung des Erdmagnetfeldes >>> S_D (= solar disturbed variation)
- S_D kann „magnetische Stürme“ mit Intensitäten von 100 – 1000 nT entsprechen.
- Die tägliche Variation und magnetische Stürme sind breitenabhängig (stärker am Pol).
- Während magnetischen Stürmen muss die magnetische Prospektion eingestellt werden. Die Ausbreitung der Radiowellen („Kurzwele“) wird gestört.

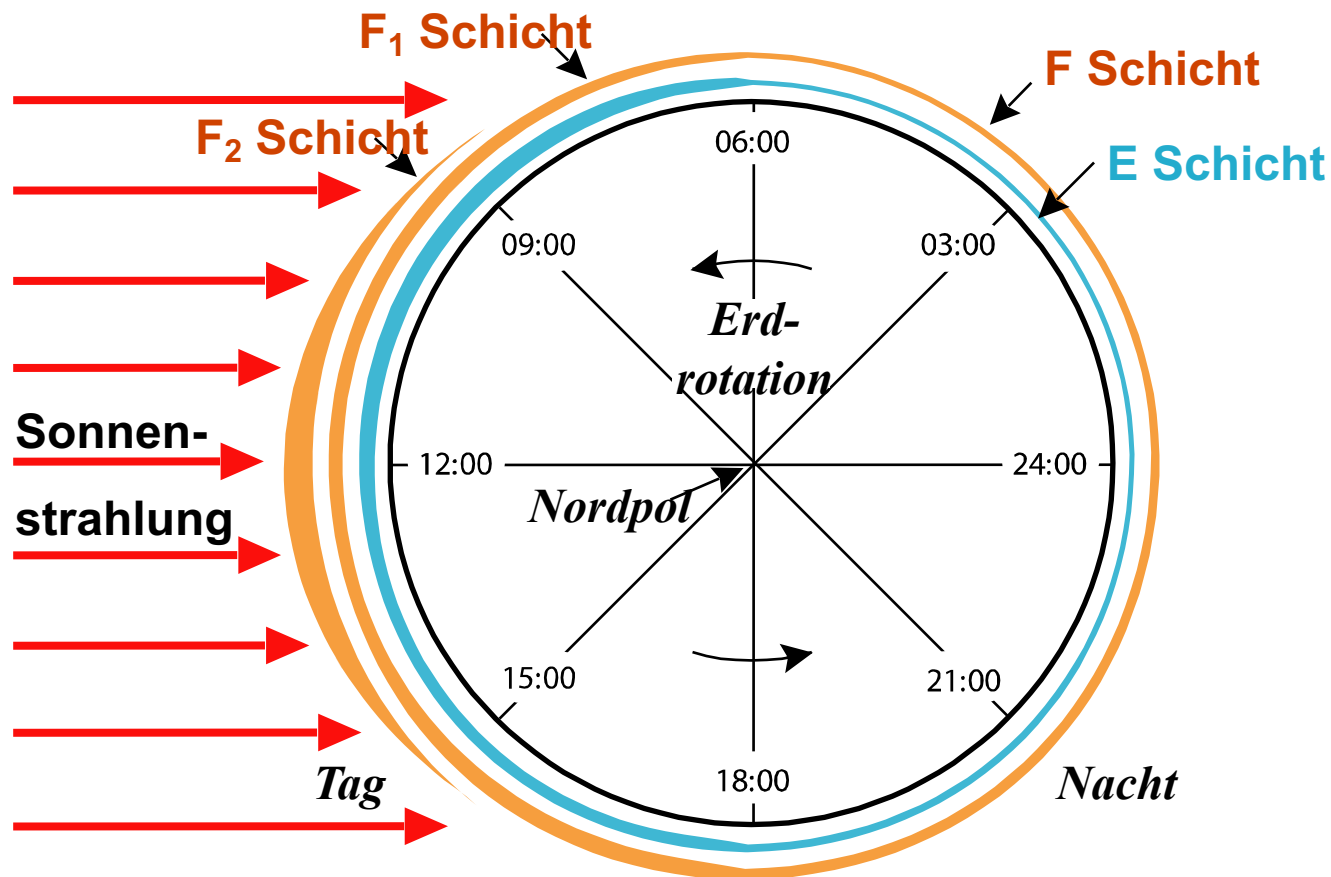
Das Außenfeld – Sonnenwind

Beispiel eines magnetischen Sturms (15. Mai, 2005).



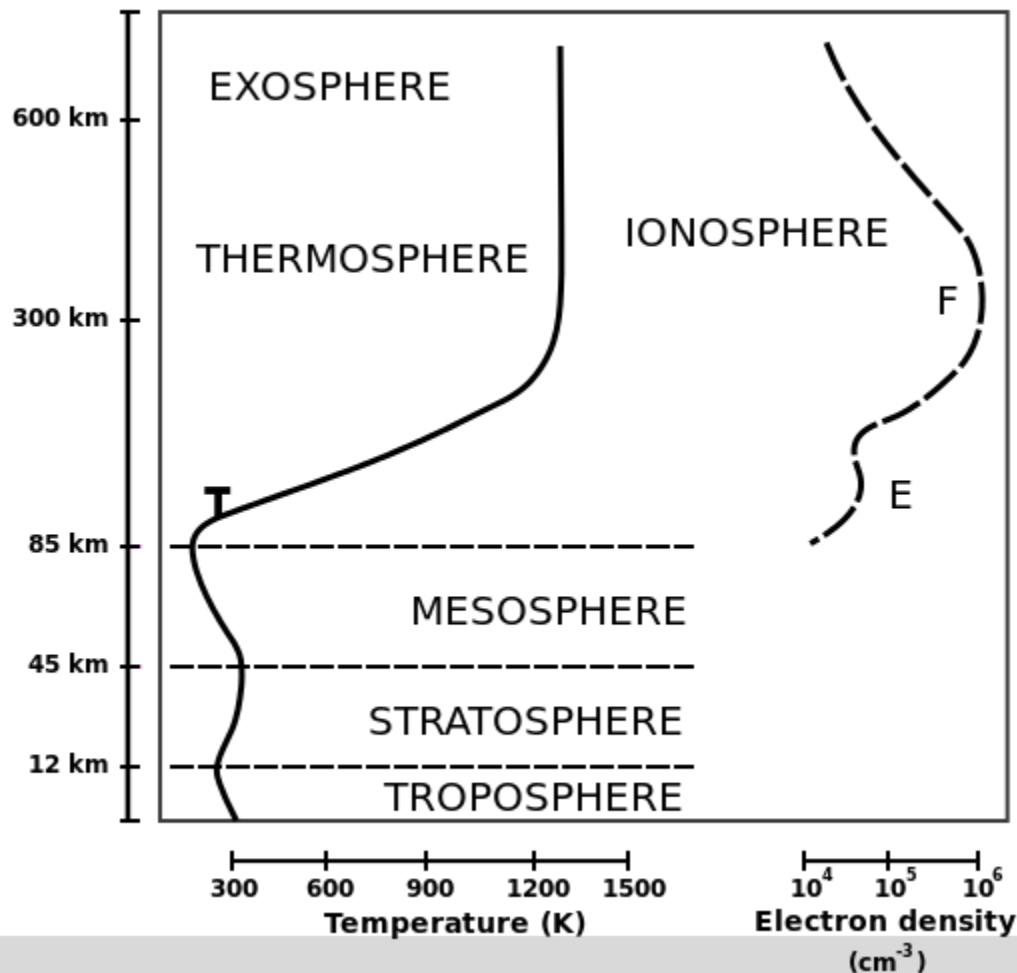
Das Außenfeld - Ionosphäre

Änderung der Ionosphäre während eines Tages

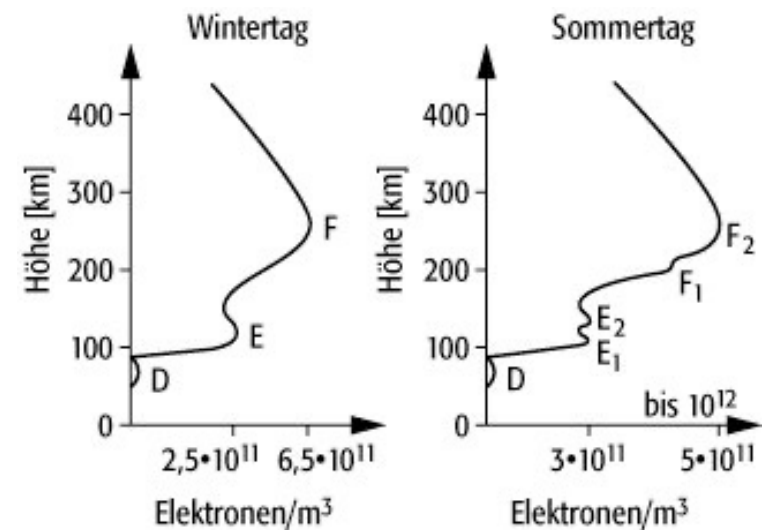


Das Außenfeld- Ionosphäre

F-Schicht und D-Schicht: Ionisation durch UV-Strahlung,
E-Schicht: Ionisation durch Röntgen-Strahlung



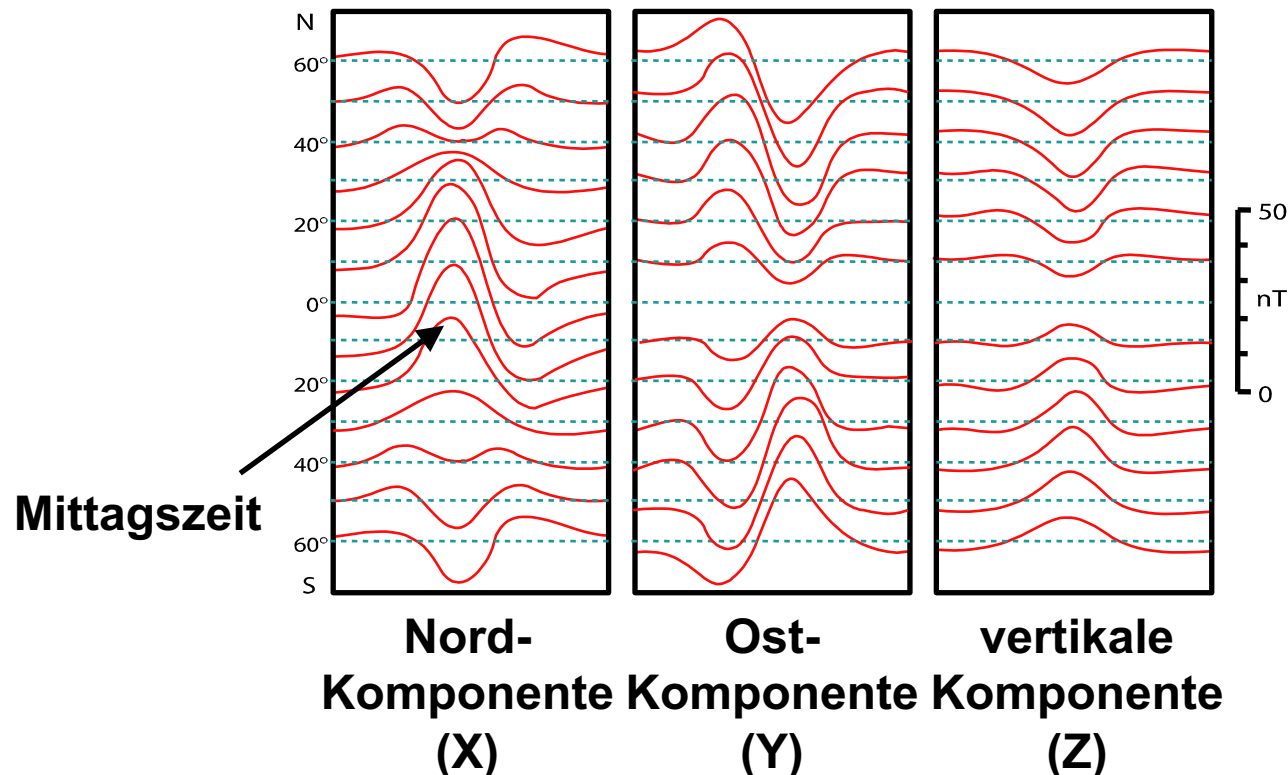
Ionosphäre: Teil der Atmosphäre eines Himmelskörpers, der große Mengen von Ionen und freien Elektronen enthält.



Das Außenfeld - Ionosphäre

Tägliche Variation des Erdmagnetfeldes: S_Q

- Infolge der Erddrehung schwanken die Magnetfelder der Ionosphäre während des Tages $\gg \gg S_Q$ (= solar quiet variation)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Zusammenfassung

- Das Erdmagnetfeld entsteht im leitfähigen flüssigen äußeren Erdkern nach dem Prinzip eines selbsterregenden Dynamos
- Es hat zu mehr als 90 % die Form eines Dipols
- Zeitliche Variationen umfassen
 - Tagesvariationen (Atmosphäre, Sonnenwind)
 - Säkularvariationen (Jahre): Polwanderung, Abnahme der Intensität
 - Polumkehrungen (ka)