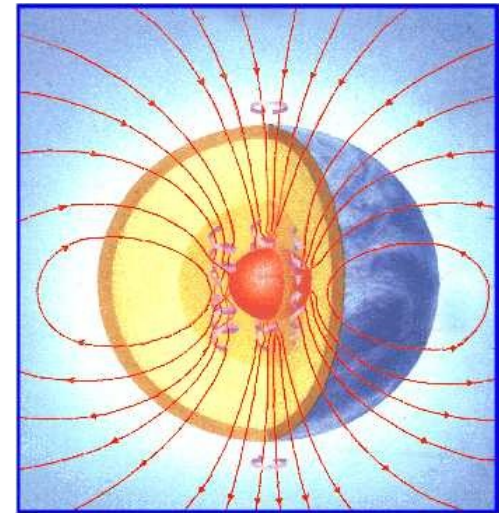


Einführung in die Geophysik II

Magnetismus und Erdmagnetfeld

Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

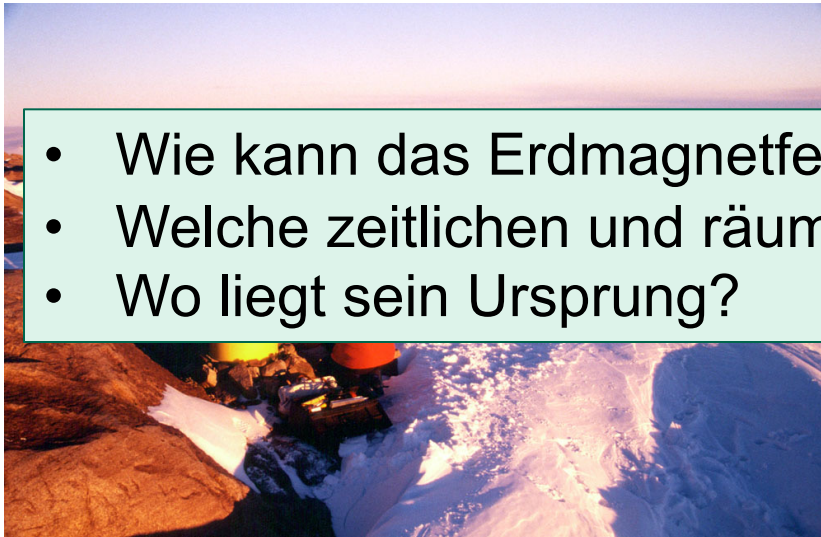


Einführung in die Geophysik II

Erdmagnetfeld

Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

- Wie kann das Erdmagnetfeld mathematisch beschrieben werden?
- Welche zeitlichen und räumlichen Änderungen treten auf?
- Wo liegt sein Ursprung?



	Vorlesung: Mi., 11:30-13:00, HS B		Übungsblatt online	Übung: Mo., 11:30-13:00, HS B Besprechung der Übungsblätter	
	19.04	keine Vorlesung		17.04	
VL1	26.04	Aufbau der Erde & Plattentektonik		24.04	
VL2	03.05	Radiometrische Altersbestimmung	Ü1	01.05	
VL3	10.05	Seismische Wellen und ihre Wechselwirkungen, elastische Eigenschaften von Gesteinen		08.05	Ü1: Radiometrische Altersbestimmung
VL4	17.05	Erdbeben: Bruchprozesse, Messung & Lokalisierung von Erdbeben	Ü2	15.05	
VL5	24.05	Ausbreitung von Erdbebenwellen, Strukturerkundung		22.05	Ü2: Seismische Wellen, elast. Eigen.
	31.05	keine Vorlesung, Pfingstwoche		29.05	
VL6	07.06	Eigenschwingungen	Ü3	05.06	
VL7	14.06	Seismizität, Gefährdung, Magnituden		12.06	
VL8	21.06	Schwere und Gravimetrie	Ü4	19.06	Ü3: Eigenschwingungen, Seismizität
VL9	28.06	Magnetismus	Ü5	26.06	Ü4: Schwere und Gravimetrie
VL10	05.07	Temperatur	Ü6	03.07	
VL11	12.07	Aufbau und Dynamik des Erdinneren: Mantel		10.07	Ü5: Magnetismus
VL12	19.07	Aufbau und Dynamik des Erdinneren: Erdkern		17.07	Ü6: Temperatur

Vorlesung: Die Vorlesung findet mittwochs um 11:30 - 13:00h im Hörsaal B (Geb. 30.22) statt und beginnt am 26.4.2023.

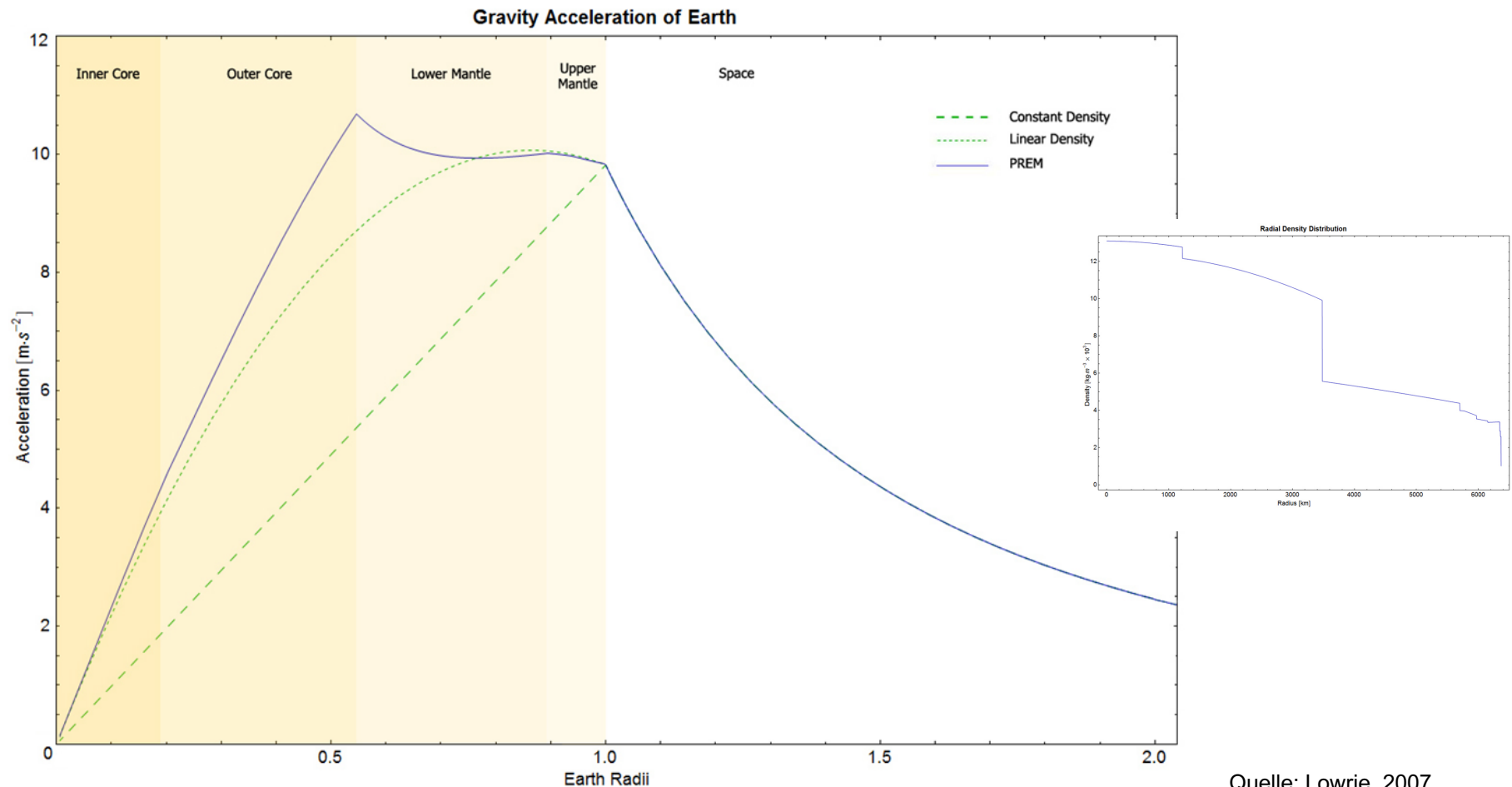
Übungen: Die Übungen finden nach obigen Zeitplan montags um 11:30 - 13:00h im Hörsaal B (Geb. 30.22) statt. Die Termine finden sich in der oben stehenden Tabelle. Übungsblätter werden nach den jeweiligen Vorlesungen online gestellt. Durch Vorrechnen von Übungsaufgaben können Punkte (max. 3) erworben werden, die auf die Klausur als Bonuspunkte* angerechnet werden. Die Punktzahl, die für das Vorrechnen der einzelnen Aufgaben vergeben wird, wird in der jeweiligen Übung bekannt gegeben.

*d.h. das Bestehen der Prüfung durch diese Punkte ist nicht möglich; bei bestandener Klausur lässt sich dadurch jedoch die Note verbessern.

Klausur: Erster Termin am 26.07.2022, 14:00 - 15:30h, zweiter Termin am 20.09.2022, 09:00 - 10:30h. Die der Ort der Klausuren ist der Otto-Lehmann-Hörsaal.

Gravitation

Erde: Effekt der inhomogenen Dichteverteilung



Quelle: Lowrie, 2007

Schweremessungen - Satellitenmessungen

Geoidundulation = Differenz von Ellipsoid und Geoid, Information über Strukturen im Erdinnern
Aufwölbung ist rot dargestellt

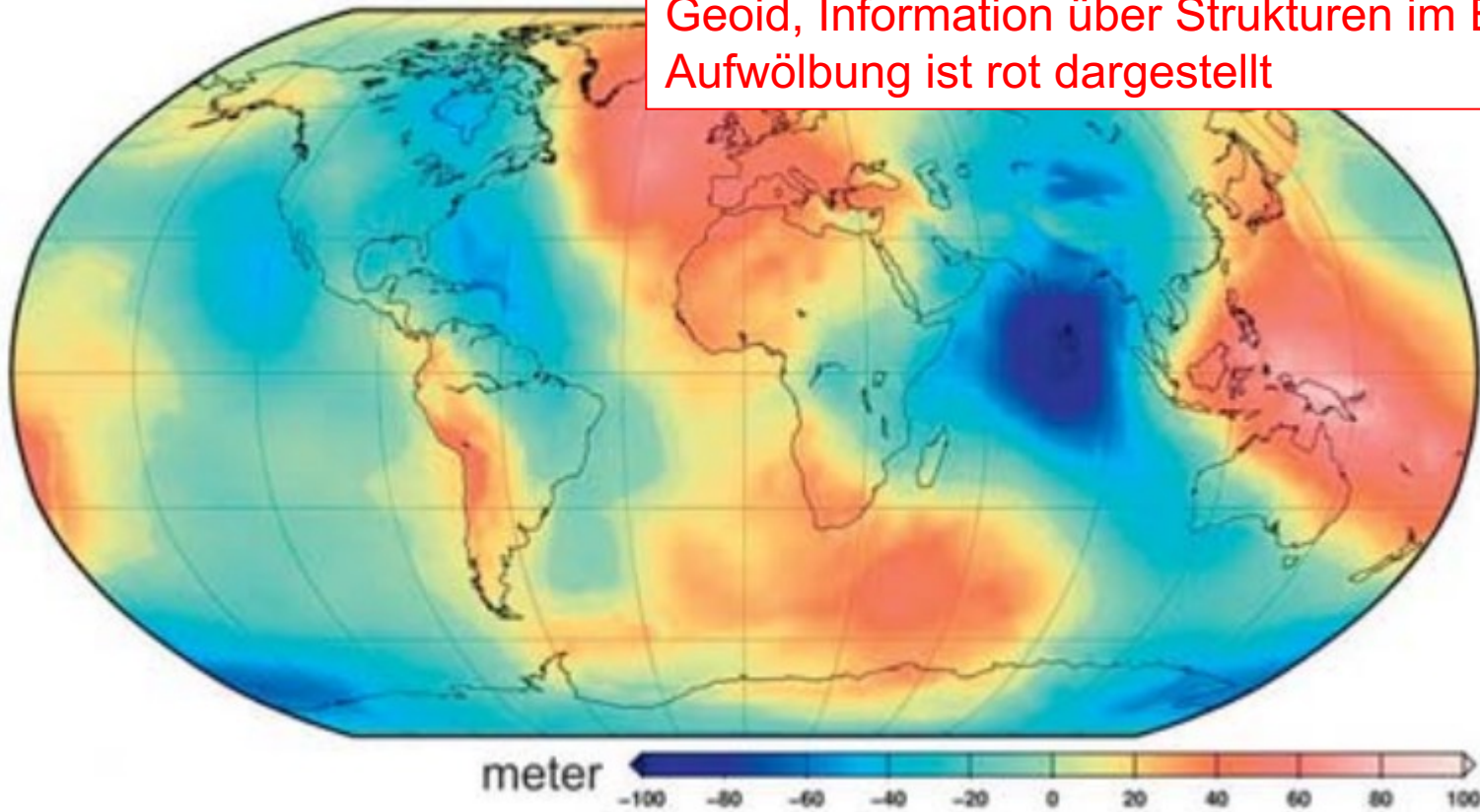
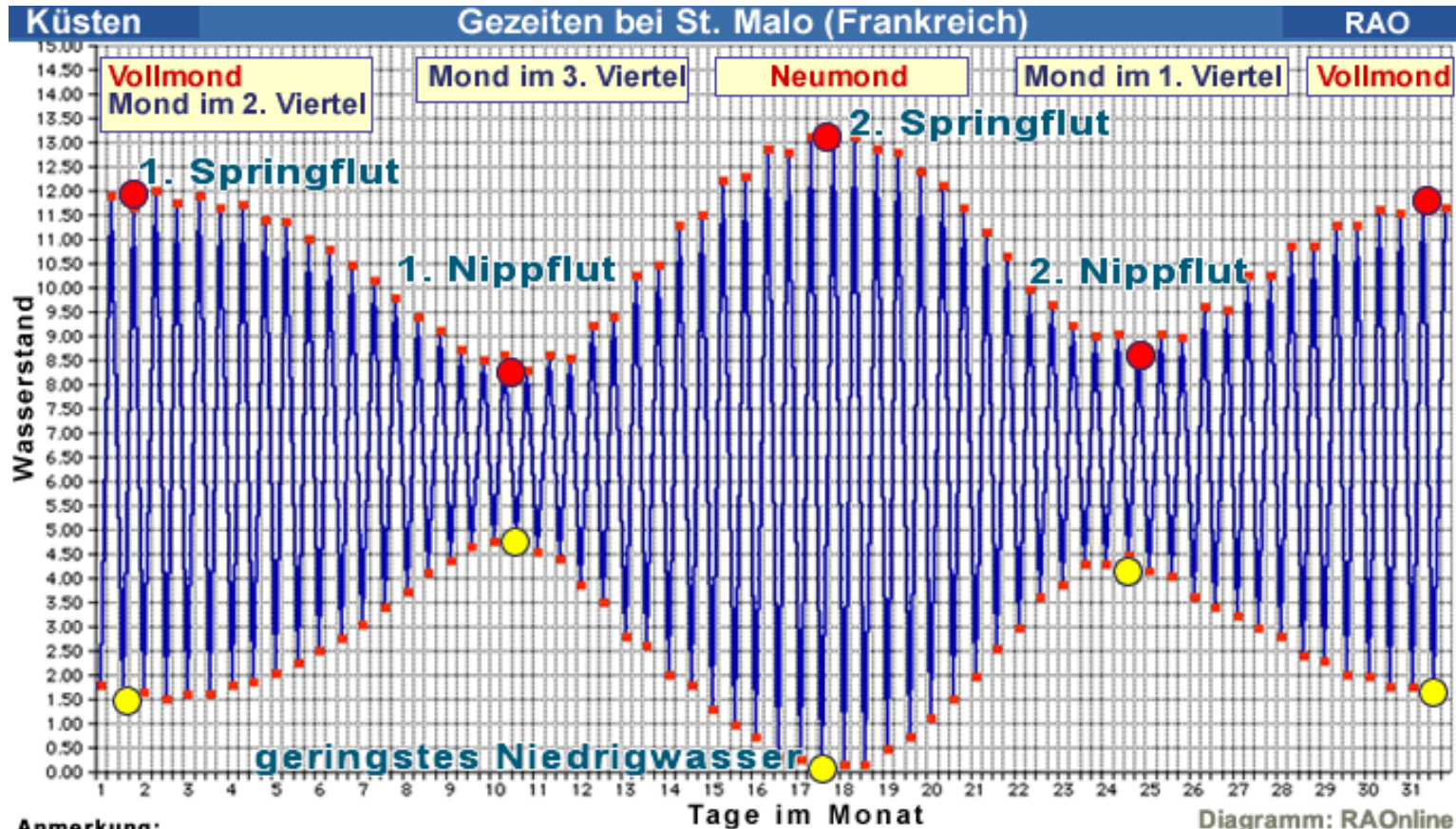


Abb. 6: Zweidimensionale Darstellungen des aktuellen Schwerefeldmodells EIGEN-5C des GFZ, als Geoidundulationen (Meter)

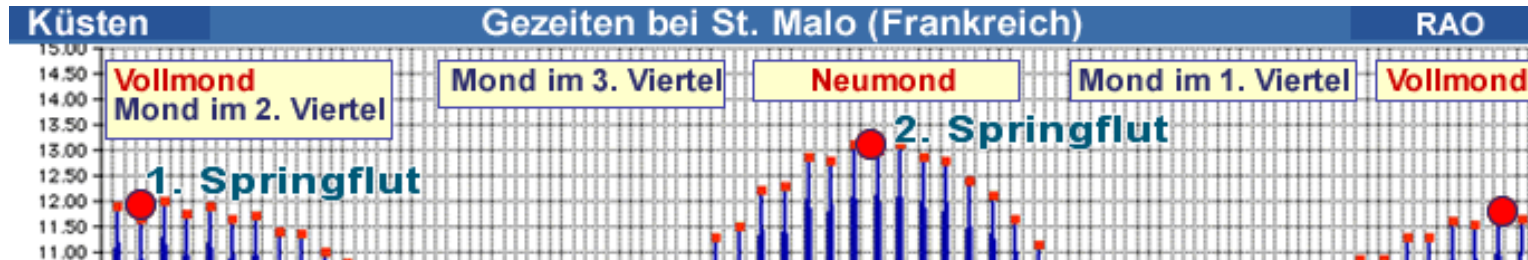
Quelle: Foerste, 2010



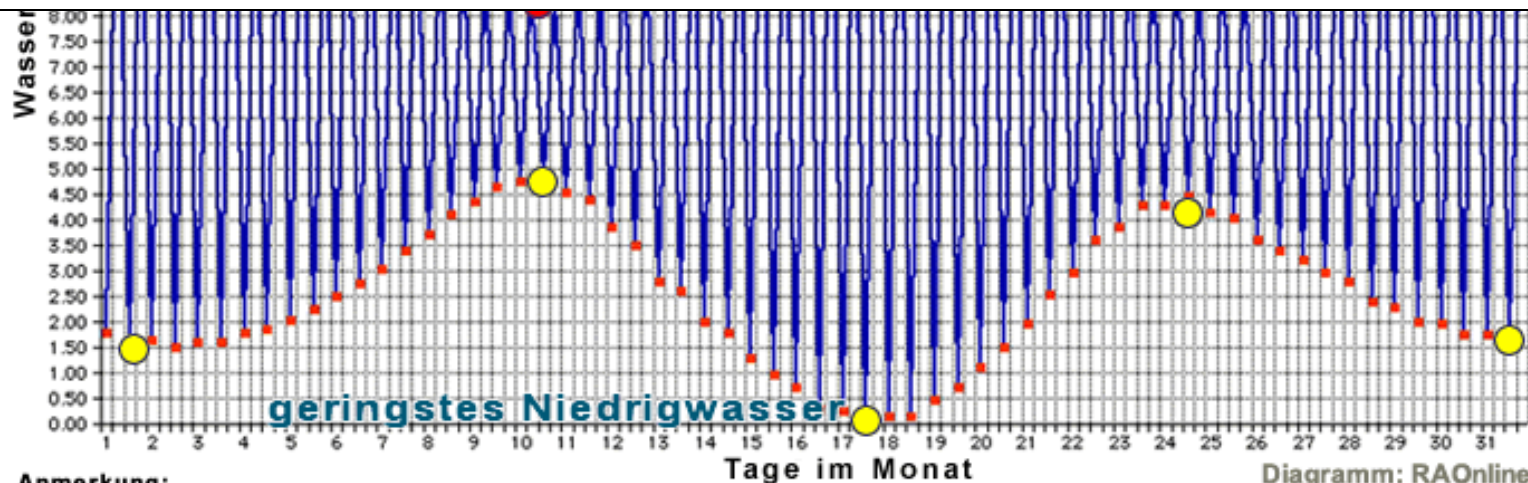
Anmerkung:

Die Daten und Zeiten für die einzelnen Gezeitenphasen hängen vom jeweiligen Mondstand ab. Die Daten für die Spring- und Nippfluten verändern sich von Monat zu Monat. Das oben dargestellte Beispiel kann daher nicht auf andere Monate übertragen werden.

Gezeiten



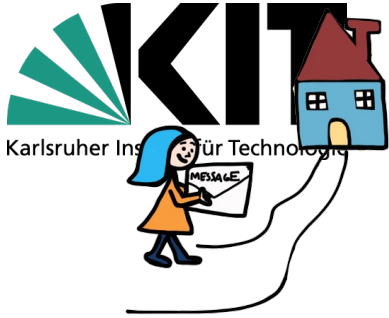
- Mittlerer Gezeitenhub der Wasseroberfläche: ± 21 cm
- Mittlerer Gezeitenhub der „festen“ Erde: ± 9 cm (bei Springflut bis zu 21 cm)



Anmerkung:

Die Daten und Zeiten für die einzelnen Gezeitenphasen hängen vom jeweiligen Mondstand ab. Die Daten für die Spring- und Nippfluten verändern sich von Monat zu Monat. Das oben dargestellte Beispiel kann daher nicht auf andere Monate übertragen werden.

Quelle: Clauser, 2015



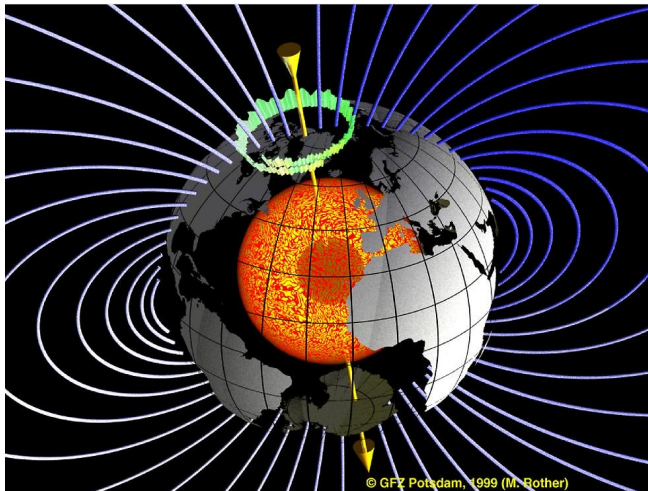
Zusammenfassung – Take-home-message

- Wie lässt sich die Gestalt der Erde (Größe, Form) beschreiben und messen?
Kugel, Ellipsoid, Geoid/ Messung heute mit Satellitenverfahren
- Wie lässt sich die Schwere physikalisch erklären und mathematisch beschreiben?
Aufteilung in Gravitations- und Zentrifugalbeschleunigung, Beschreibung als Potential, Addition der Potentiale
- Wie lässt sich die Schwere messen (= Gravimetrie)?
siehe oben, Messung der Gestalt der Erde
- Welchen Einfluss haben die Gezeiten auf die Schweremessungen?
Größenordnung 10^{-7} – diese Genauigkeit ist erforderlich, um Gezeiten zu messen

Das Erdmagnetfeld

Nicht wahrnehmbar, aber doch nützlich:

- Navigation, Magnetkompass
- dient Vögeln zur Orientierung
- Schutzschild für die Erde
- liefert Information über das Innere der Erde, insbesondere Prozesse an der Kern/Mantel-Grenze.



Historische Daten

- **500 B.C:** Griechen entdecken magnetische Eigenschaften des Magneteisensteins (Magnetit)
- **500 A.:** Chinesen erfinden den Magnetkompass
- **14. Jh.:** Reisende bringen Kompass nach Europa, Voraussetzung für Zeitalter der Entdeckung: Columbus, Magellan
- **1600:** William Filbert, "De Magnete": Alle Kenntnisse über Magnetismus als Buch niedergeschrieben. Aus Experimenten folgert er: Die Erde ist selbst ein großer Magnet
- **1634:** Gellibrand (London) entdeckt zeitliche Änderung der Deklination (Säkularvariation)
- **>16. Jh.:** Kontinuierliche Beobachtung des erdmagnetischen Feldes
- **1831:** James Clar Ross, Expedition zum geomagnetischen Nordpol
- **1908-09** David und Mason, Expedition zum geomagnetischen Südpol

Fundamentale Eigenschaften und Größen

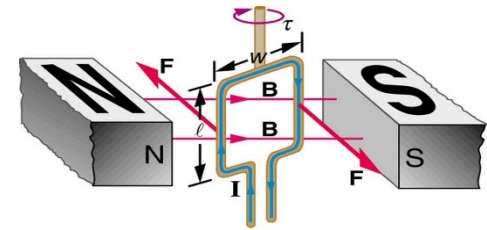
- Magnetische Größen treten nie als Monopole auf: Feldlinien sind geschlossen
- Magnetische Nordpole = Quellen des Magnetfelds/ Südpole = Senken
- Gleichnamige Pole stoßen sich ab

- Magnetische Größen treten nie als Monopole auf: Feldlinien sind geschlossen
- Magnetische Nordpole = Quellen des Magnetfelds/ Südpole = Senken
- Gleichnamige Pole stoßen sich ab

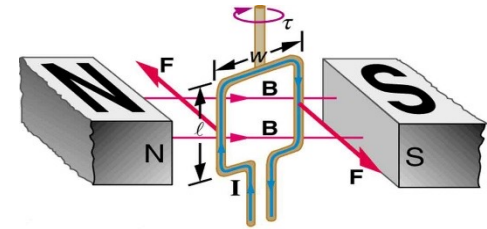
- Magnetische Feldstärke: **B** (Einheit: T)

Definition: $\mathbf{F} = I (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$

l : Länge eines von einem Strom I durchflossenen Leiters



- Magnetische Größen treten nie als Monopole auf: Feldlinien sind geschlossen
- Magnetische Nordpole = Quellen des Magnetfelds/ Südpole = Senken
- Gleichnamige Pole stoßen sich ab



- Magnetische Feldstärke: **B** (Einheit: T)

Definition: $\mathbf{F} = I (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$

l : Länge eines von einem Strom I durchflossenen Leiters

- Magnetische Erregung: **H** (Einheit Am^{-1})

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad \text{mit } \mu = \text{magnetische Permeabilität}$$

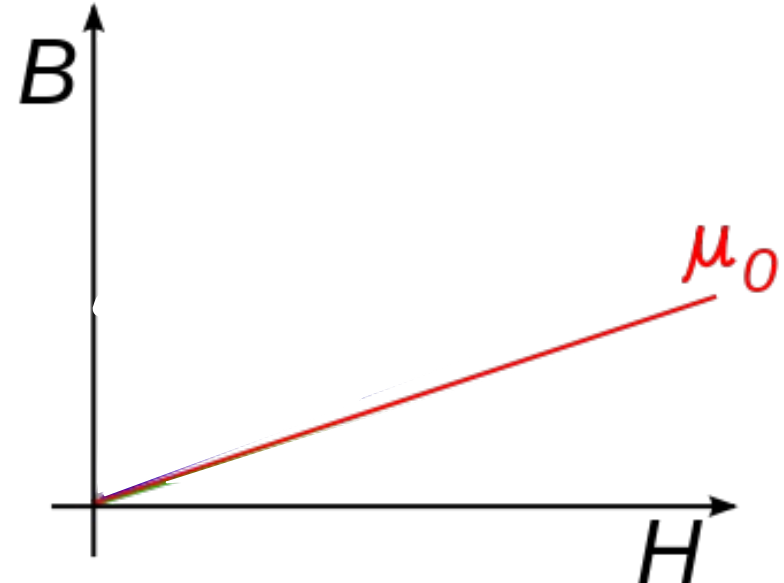
Magnetische Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \mu_R$$

mit μ = magnetische Permeabilität, Permeabilität = Durchlässigkeit

μ_0 = magnetische Permeabilität des Vakuums, magn. Feldkonstante

μ_R = relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl
(dimensionslos): gibt Verhältnis der Permeabilität des Stoffs zu
der Permeabilität im Vakuum an



Magnetische Permeabilität

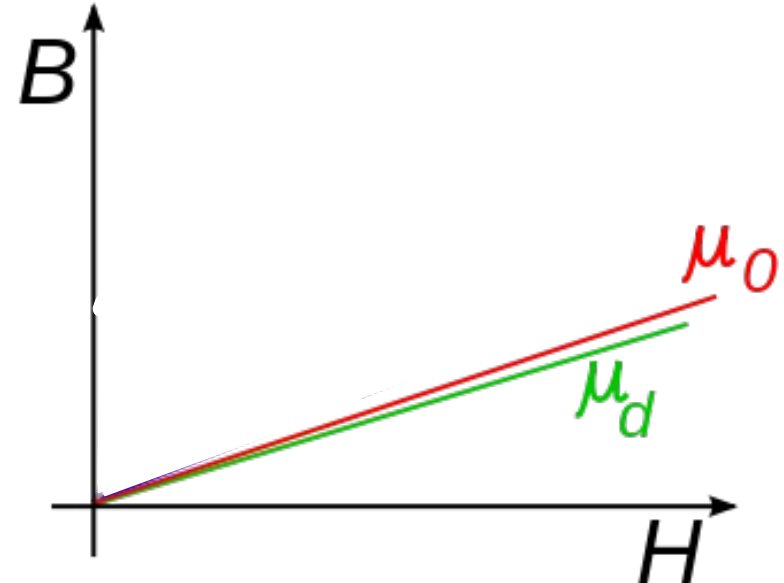
$$\mu = \mu_0 \mu_R$$

mit μ = magnetische Permeabilität

μ_0 = magnetische Permeabilität des Vakuums, magn. Feldkonstante

μ_R = relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl
(dimensionslos): gibt Verhältnis der Permeabilität des Stoffs zu
der Permeabilität im Vakuum an

$0 < \mu_R < 1$: Diamagnetismus: Stoffe verdrängen
das Magnetfeld aus dem Inneren



Magnetische Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \mu_R$$

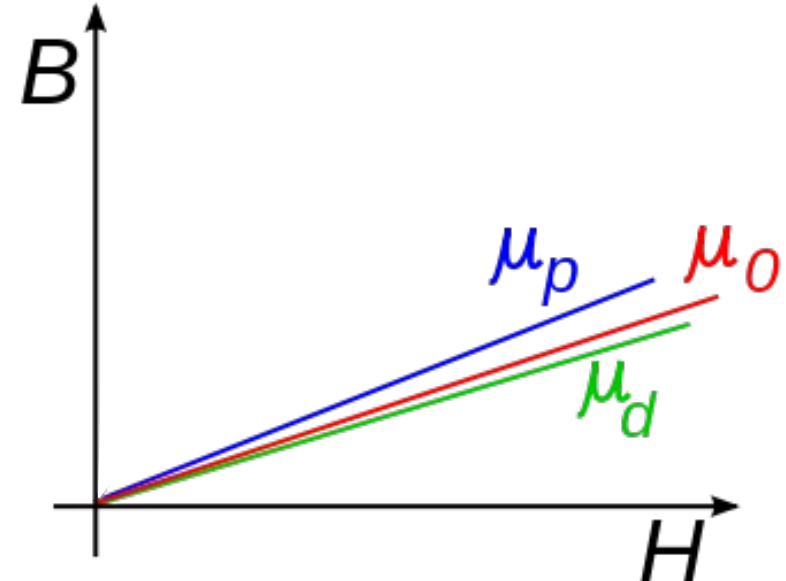
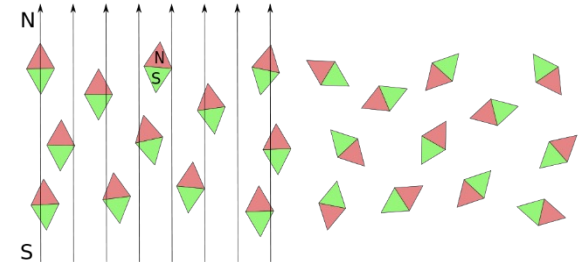
mit μ = magnetische Permeabilität

μ_0 = magnetische Permeabilität des Vakuums, magn. Feldkonstante

μ_R = relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl
(dimensionslos): gibt Verhältnis der Permeabilität des Stoffs zu
der Permeabilität im Vakuum an

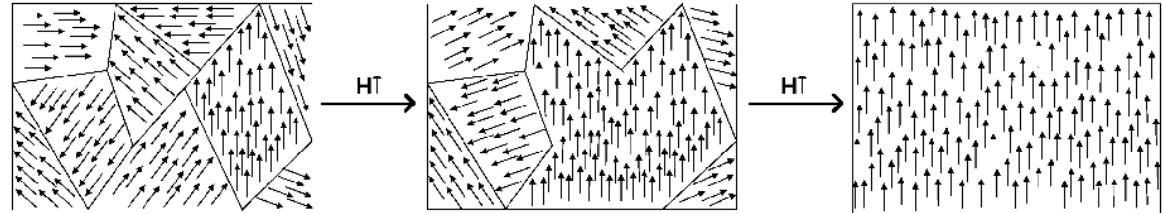
$0 < \mu_R < 1$: Diamagnetismus: Stoffe verdrängen
das Magnetfeld aus dem Inneren

$\mu_R > 1$: Paramagnetismus: Im Inneren der
Stoffe wird Magnetfeld leicht verstärkt



Magnetische Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \mu_R$$



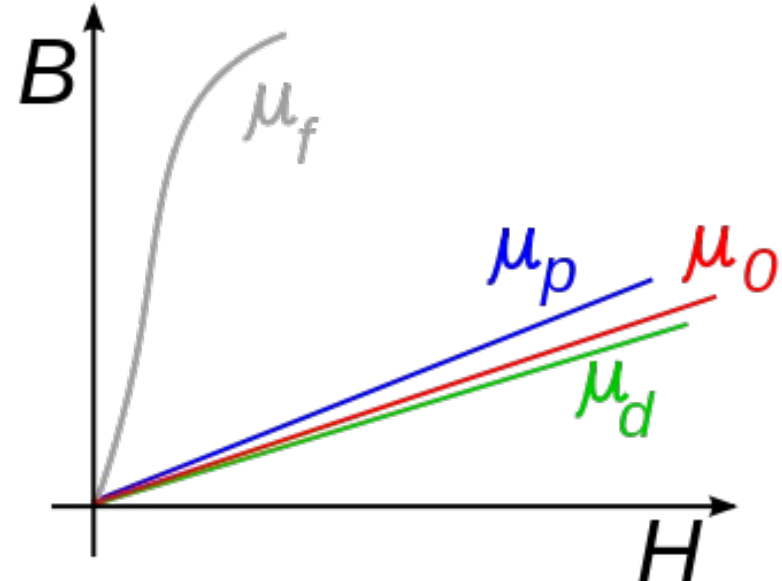
mit μ = magnetische Permeabilität

μ_0 = magnetische Permeabilität des Vakuums, magn. Feldkonstante

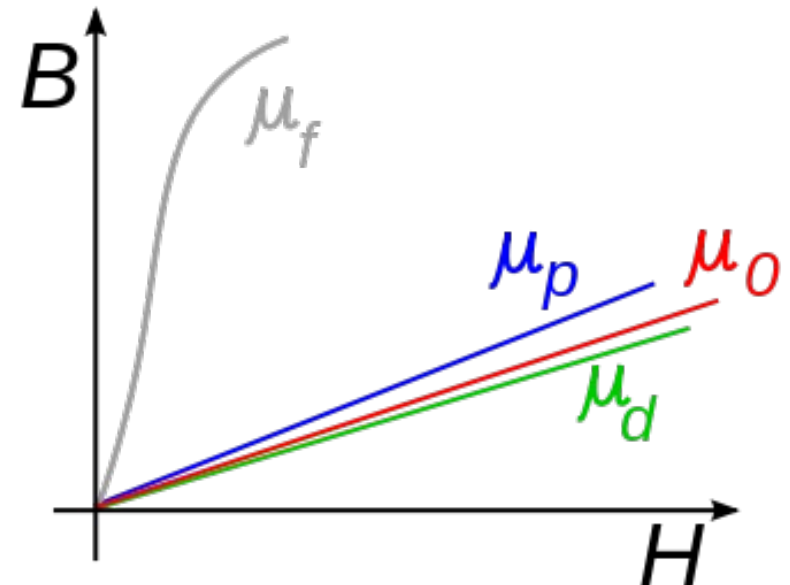
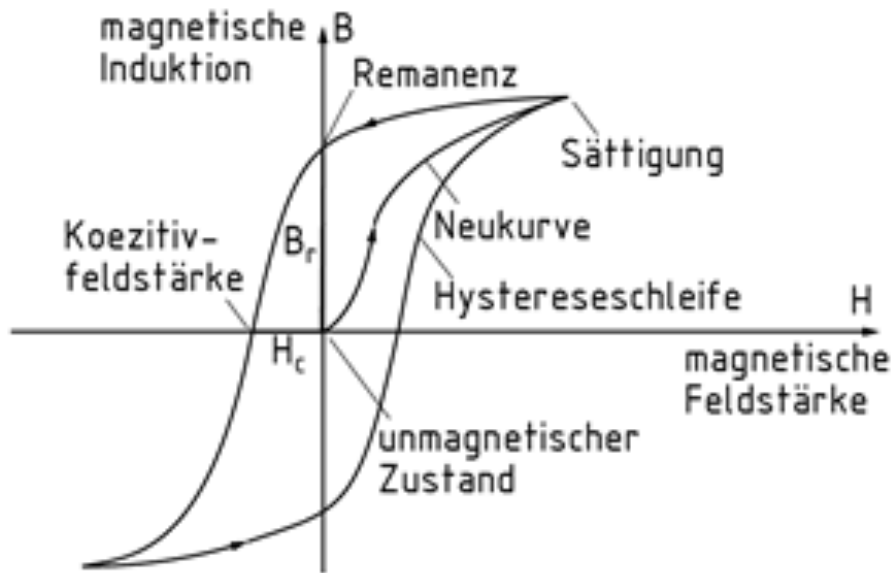
μ_R = relative magnetische Permeabilität, Permeabilitätszahl
(dimensionslos): gibt Verhältnis der Permeabilität des Stoffs zu der Permeabilität im Vakuum an

Quelle: Wikipedia; Der ursprünglich hochladende Benutzer war 4lex in der Wikipedia auf Spanisch - Übertragen aus es.wikipedia nach Commons., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2172444>

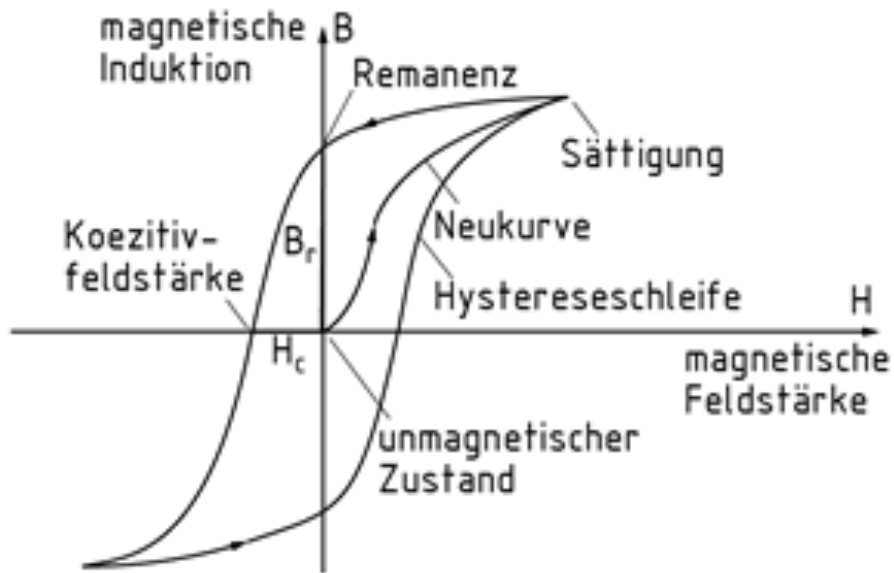
- $0 < \mu_R < 1$: Diamagnetismus: Stoffe verdrängen das Magnetfeld aus dem Inneren
- $\mu_R > 1$: Paramagnetismus: Im Inneren der Stoffe wird Magnetfeld leicht verstärkt
- $\mu_R \gg 1$: Ferromagnetismus: Im Inneren der Stoffe wird Magnetfeld stark verstärkt durch Kopplung der magnetischen Momente auch über Grenzen der Weiß-Bezirke hinweg



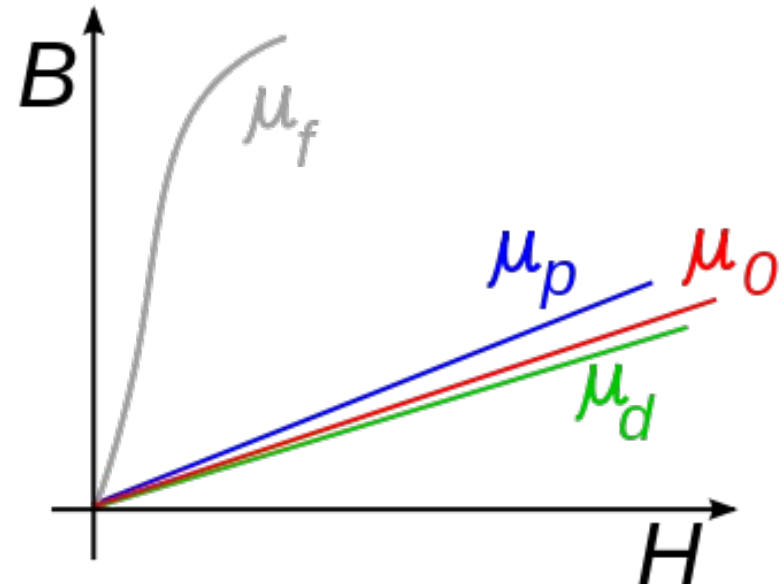
Magnetische Permeabilität



Magnetische Permeabilität



Bei Überschreiten der Curie-Temperatur verschwinden ferromagnetische Eigenschaften, Materialien sind nur noch paramagnetisch



Parallel verwendete Bezeichnungen

B	H
Magnetische Induktion/ Magnetische Flussdichte	Magnetische Feldstärke/ Magnetfeld
Magnetische Feldstärke	Magnetische Erregung

Das Erdmagnetfeld

Das Erdmagnetfeld besteht aus drei Komponenten:

- Dipolfeld = Außenfeld in der Nähe der Erde; hat Ursachen im tiefen Inneren der Erde: 94% des Erdmagnetfelds werden vom äußeren flüssigen Kern der Erde aufrecht erhalten: Geodynamo
- Nicht-Dipol-Feld, Multipolfeld, Ursache für Säkularvariationen, ca. 4-5%
- Außenfeld: entsteht durch Ströme geladener Teilchen in der Magnetosphäre und Ionosphäre, die von der Sonne beeinflusst werden, Verformung des Dipolfelds

Außerdem: Lokales Anomaliefeld, Messung durch magnetische Messverfahren, Einführung in die Geophysik 1

Das Erdmagnetfeld

Das Erdmagnetfeld besteht aus drei Komponenten:

- Dipolfeld = Außenfeld in der Nähe der Erde; hat Ursachen im tiefen Inneren der Erde: 94% des Erdmagnetfelds werden vom äußeren flüssigen Kern der Erde aufrecht erhalten: Geodynamo
- Nicht-Dipol-Feld, Multipolfeld, ca. 4-5%
- Außenfeld: entsteht in der Magnetosphäre und Ionosphäre, die von der Sonne beeinflusst werden, Verformung des Dipolfelds

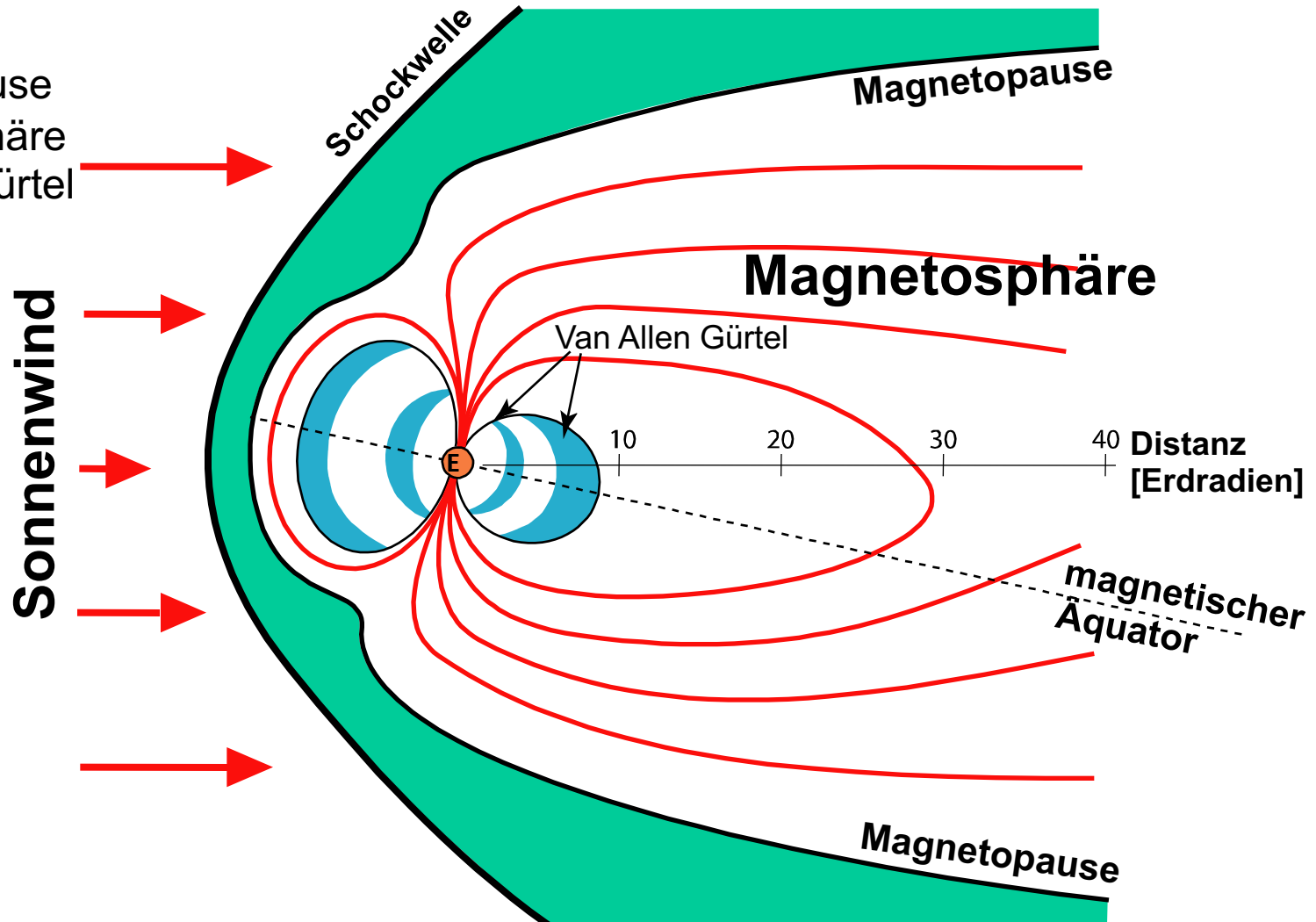
Ganz kurze Wiederholung

Außerdem: Lokales Anomaliefeld, Messung durch magnetische Messverfahren, Einführung in die Geophysik 1

Das Erdmagnetfeld: Außenfeld

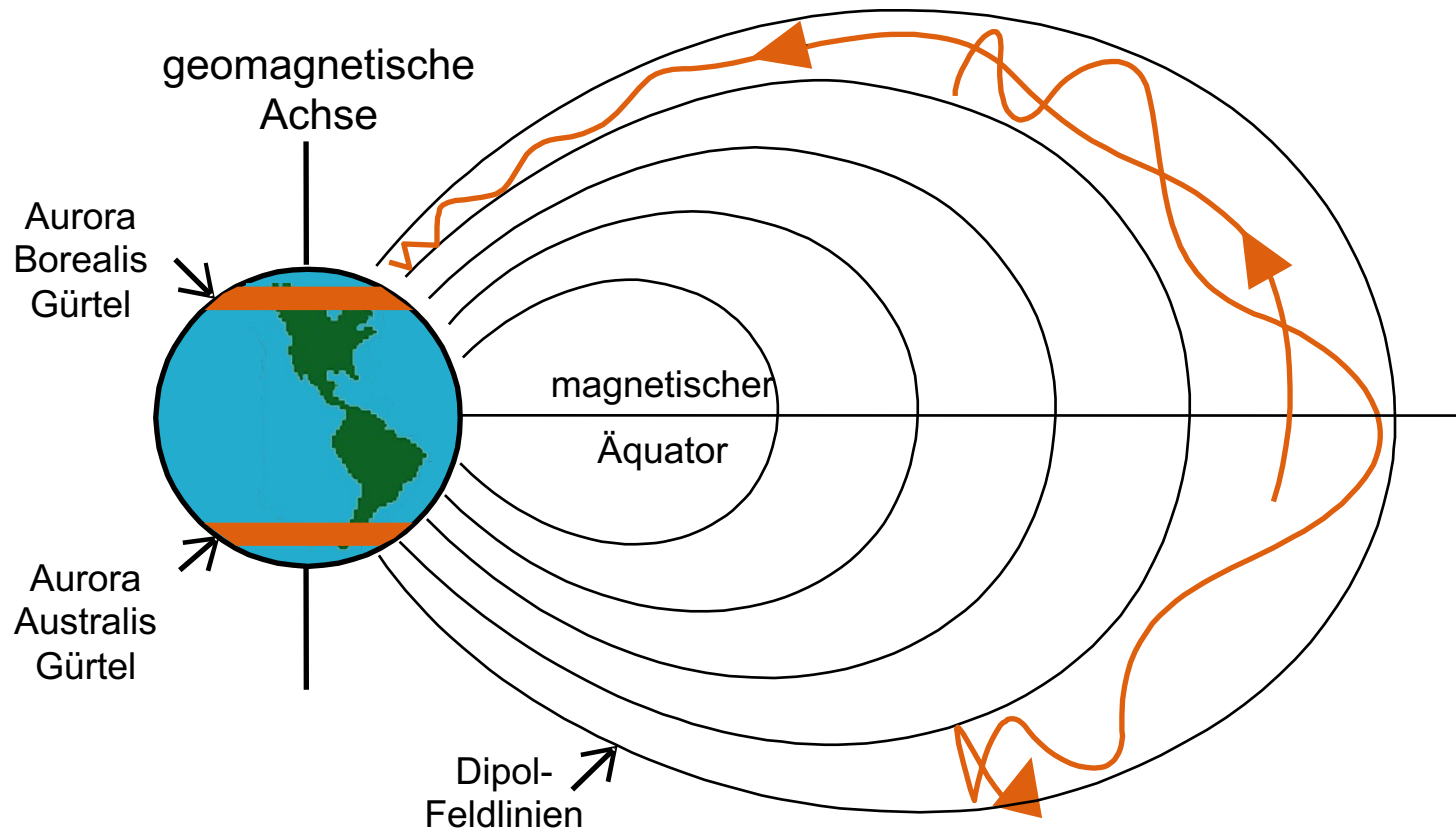
Außenfeld:

- Magnetopause
- Magnetosphäre
- Van Allen Gürtel
- Ionosphäre

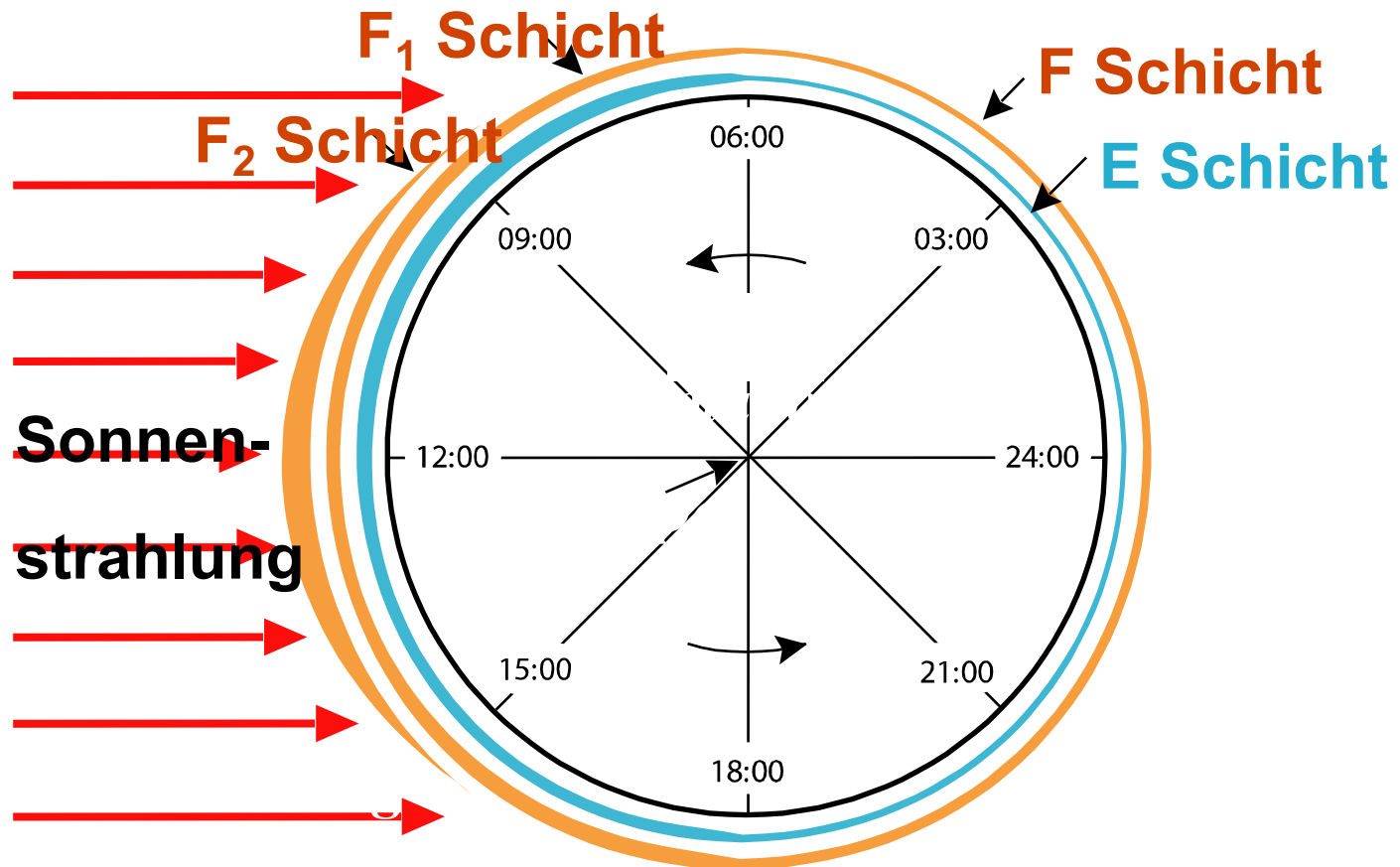


Das Erdmagnetfeld

Die Bewegung der eingefangenen geladenen Partikel im erdmagnetischen Feld



Änderung der Ionosphäre während eines Tages



Das Erdmagnetfeld

Tägliche Variation des Erdmagnetfelds

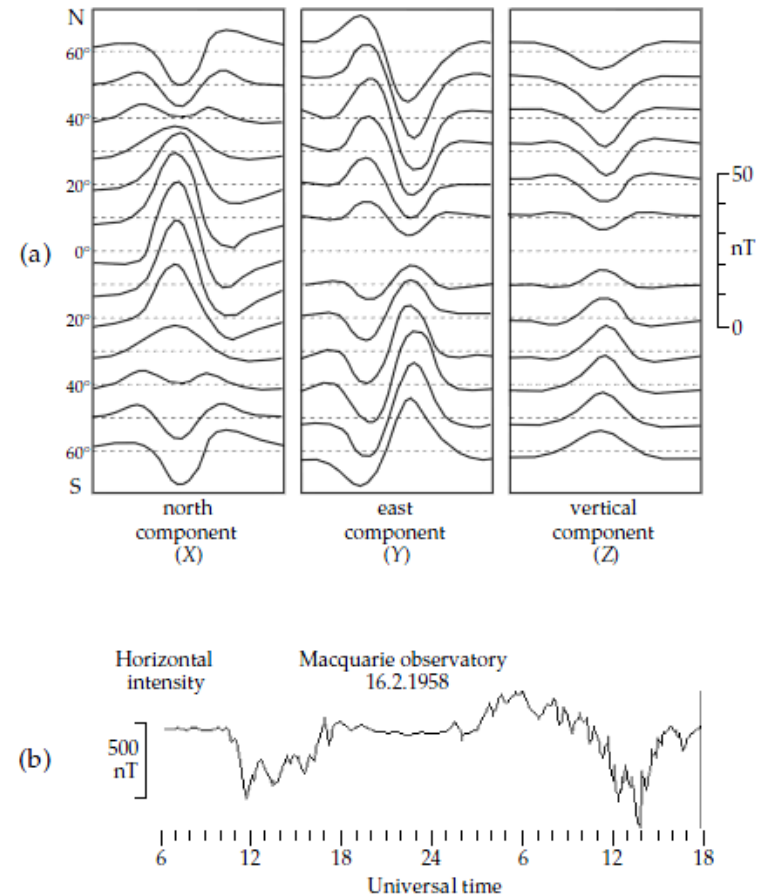
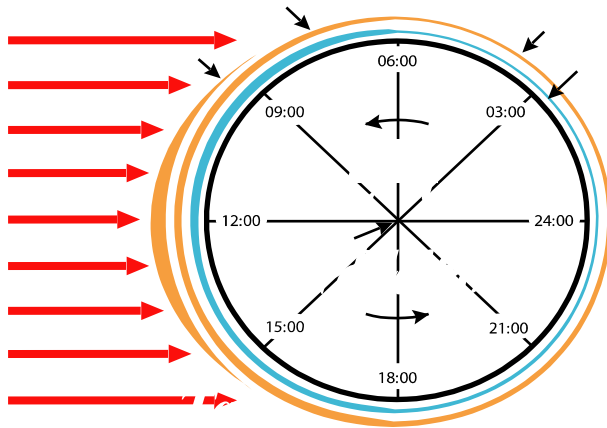


Fig. 5.32 (a) The time-dependent daily (or diurnal) variation of the components of geomagnetic field intensity at different latitudes (after Chapman and Bartels, 1940), and (b) the variation of horizontal field intensity during a magnetic storm (after Ondoh and Maeda, 1962).

Das Erdmagnetfeld

Ursache für tägliche Variation des Erdmagnetfelds:

Tägliche Variation ist wichtig
für kleinräumige Messungen:
Einführung in die Geophysik 1

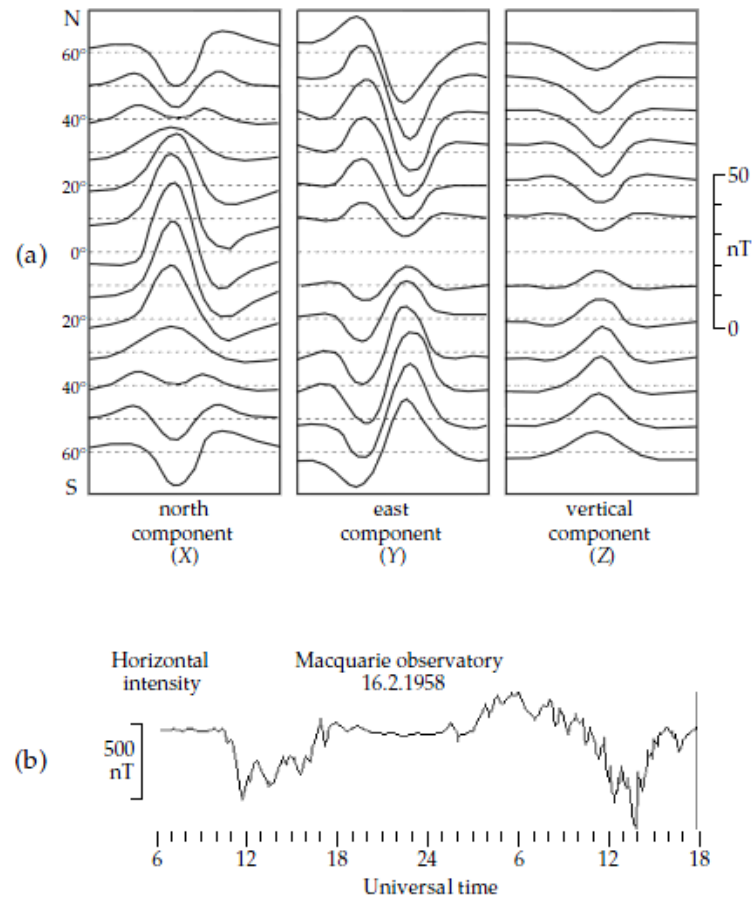
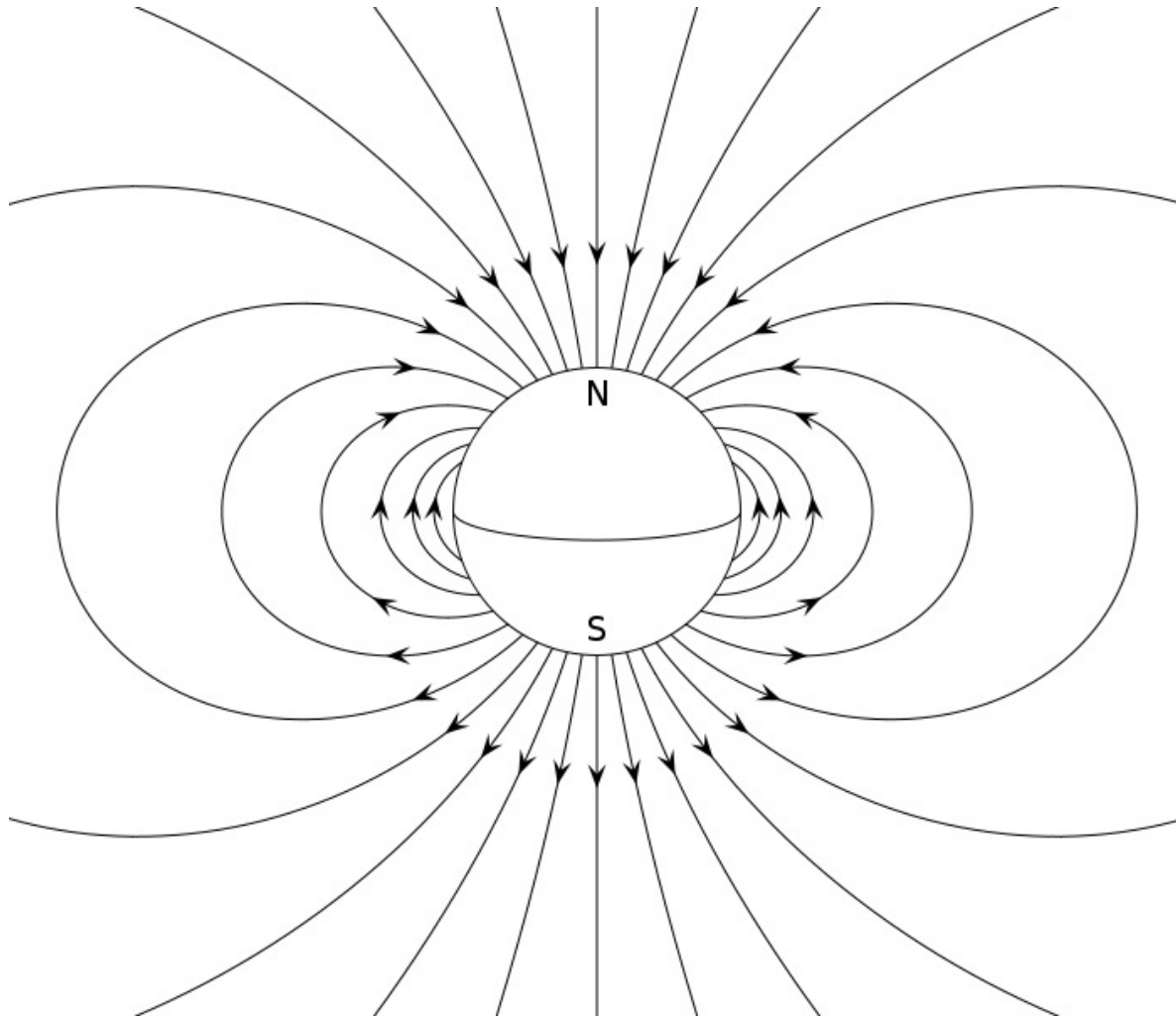


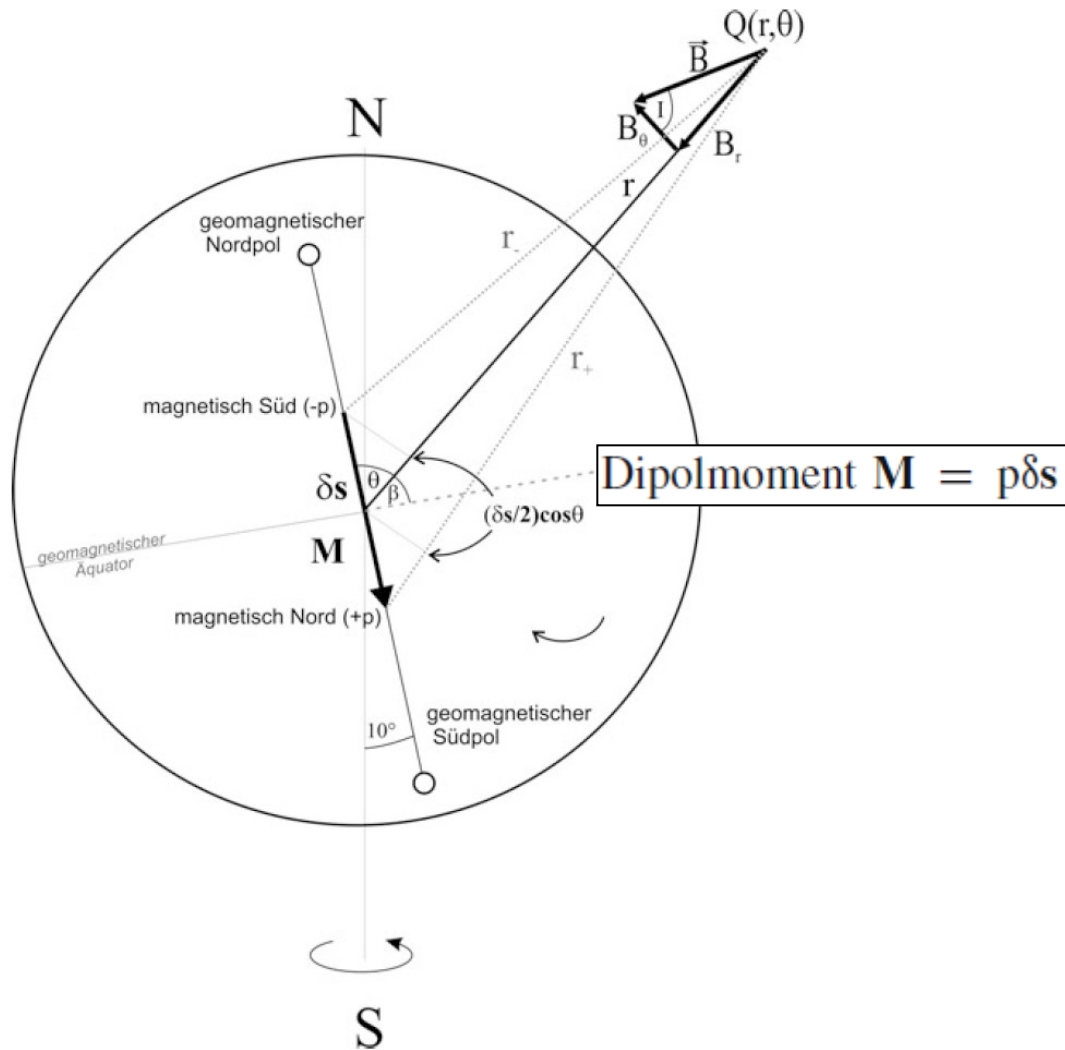
Fig. 5.32 (a) The time-dependent daily (or diurnal) variation of the components of geomagnetic field intensity at different latitudes (after Chapman and Bartels, 1940), and (b) the variation of horizontal field intensity during a magnetic storm (after Ondoh and Maeda, 1962).

Erdmagnetfeld

Dipolfeld im Außenraum

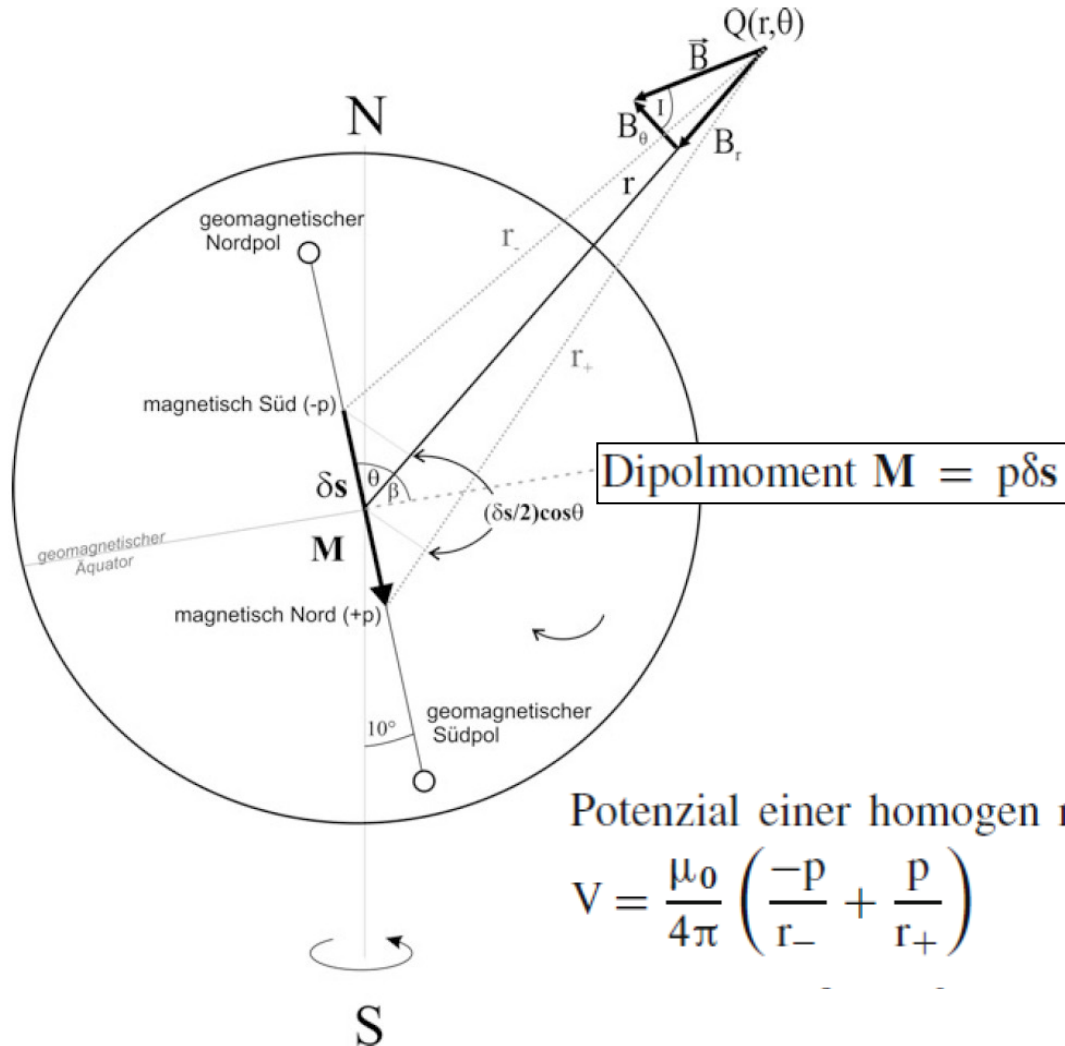


Beschreibung des Dipolfelds



Clauser, 2015

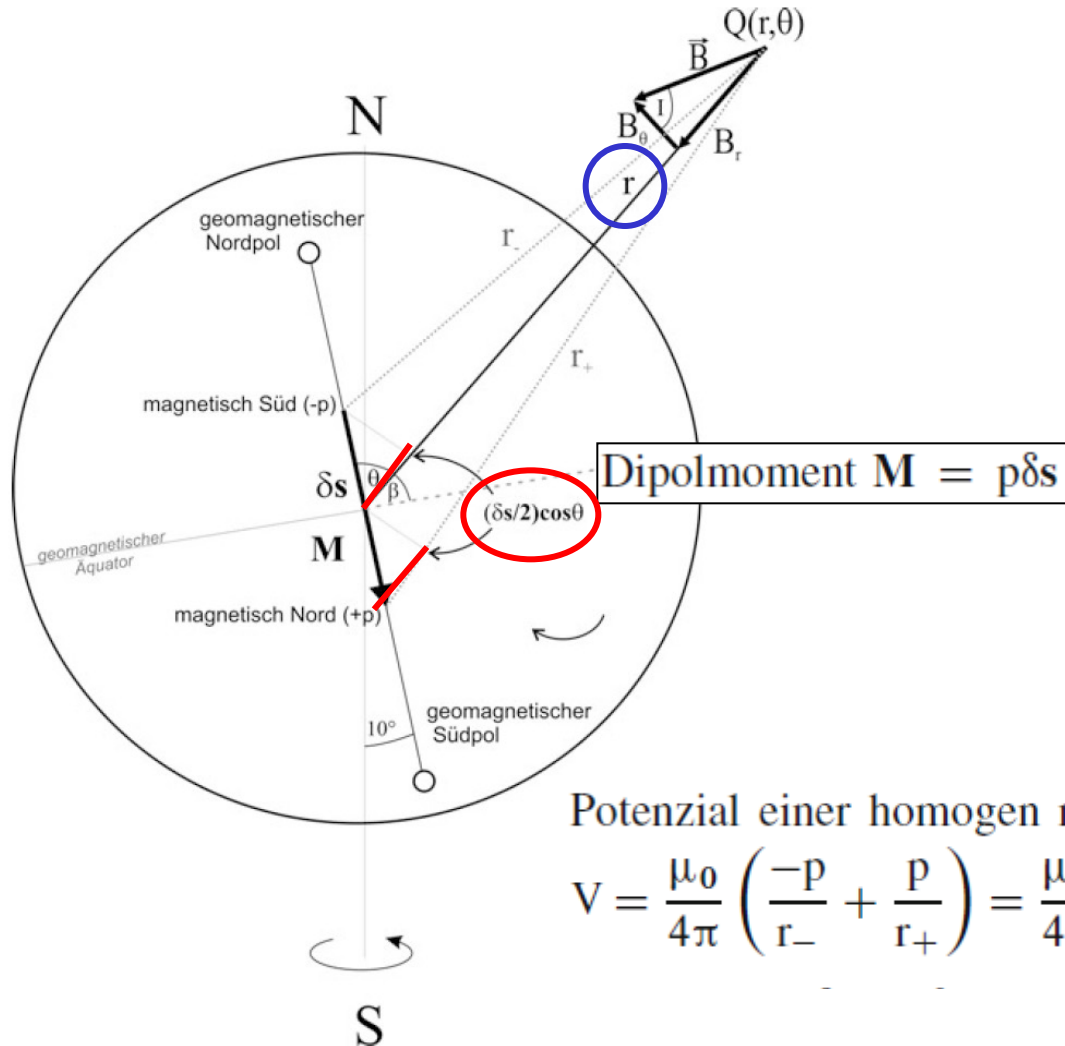
Beschreibung des Dipolfelds



Potenzial einer homogen magnetisierten Kugel

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right)$$

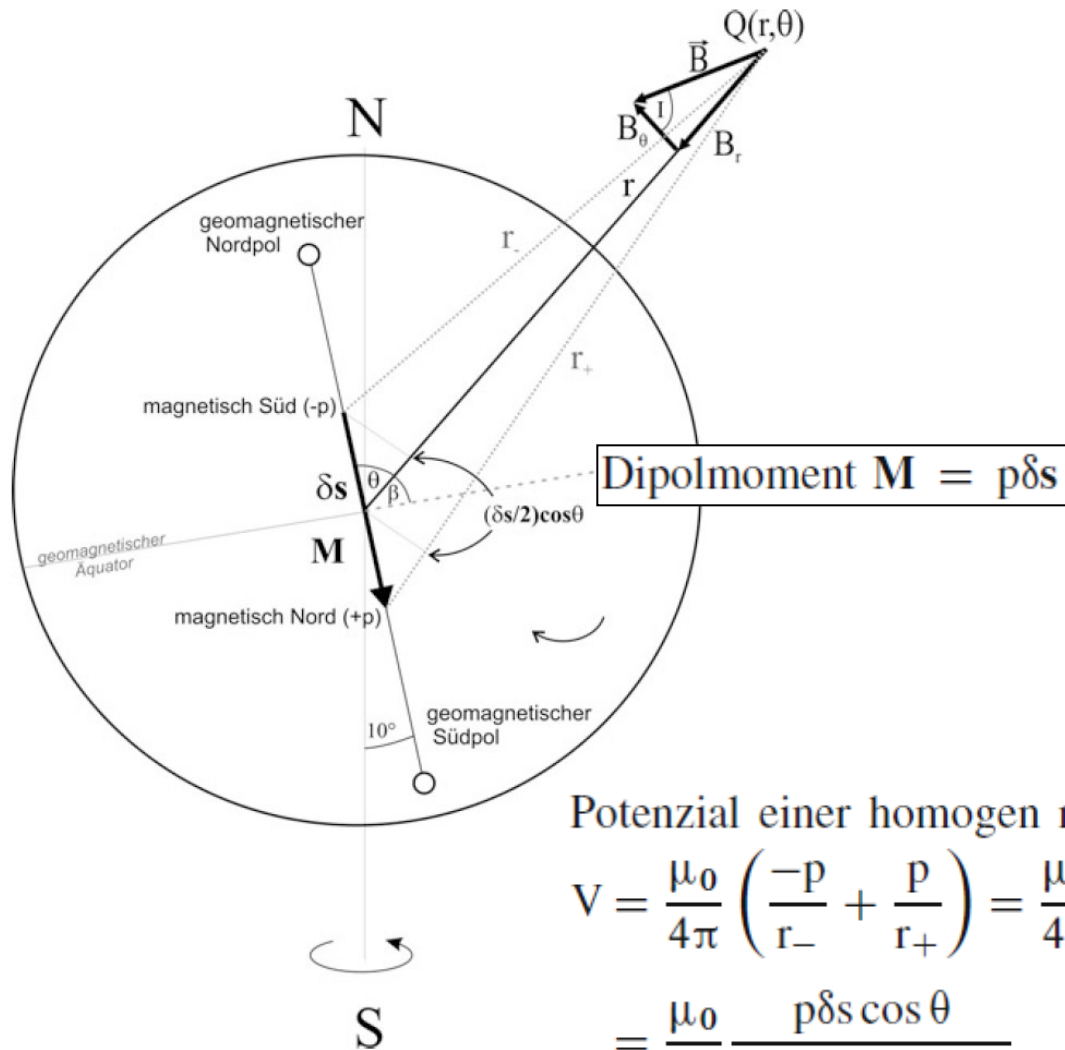
Beschreibung des Dipolfelds



Potenzial einer homogen magnetisierten Kugel

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r - \frac{\delta s}{2} \cos \theta} + \frac{p}{r + \frac{\delta s}{2} \cos \theta} \right)$$

Beschreibung des Dipolfelds

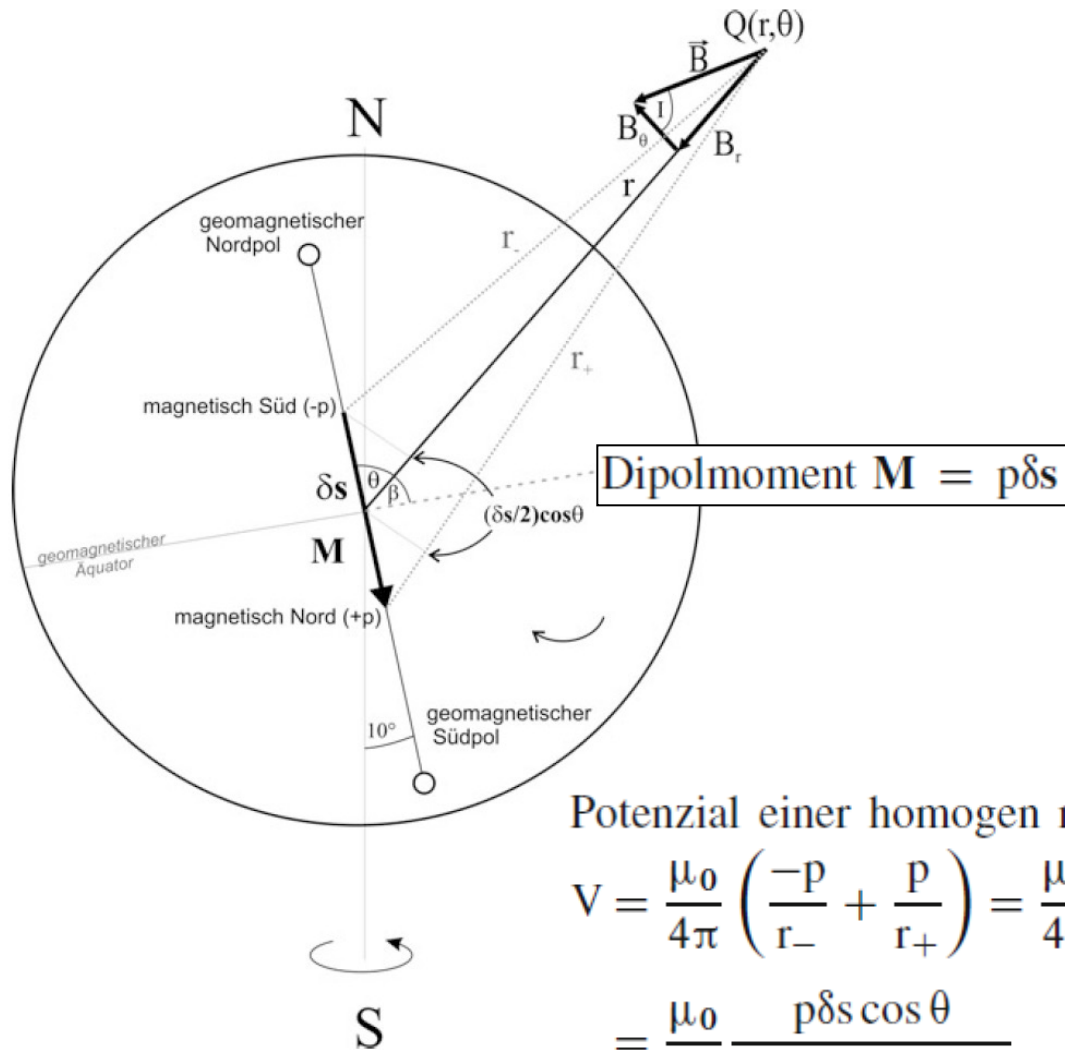


Potenzial einer homogen magnetisierten Kugel

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r + \frac{\delta s}{2} \cos \theta} + \frac{p}{r - \frac{\delta s}{2} \cos \theta} \right)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p \delta s \cos \theta}{r^2 - \left(\frac{\delta s}{2} \cos \theta \right)^2}$$

Beschreibung des Dipolfelds

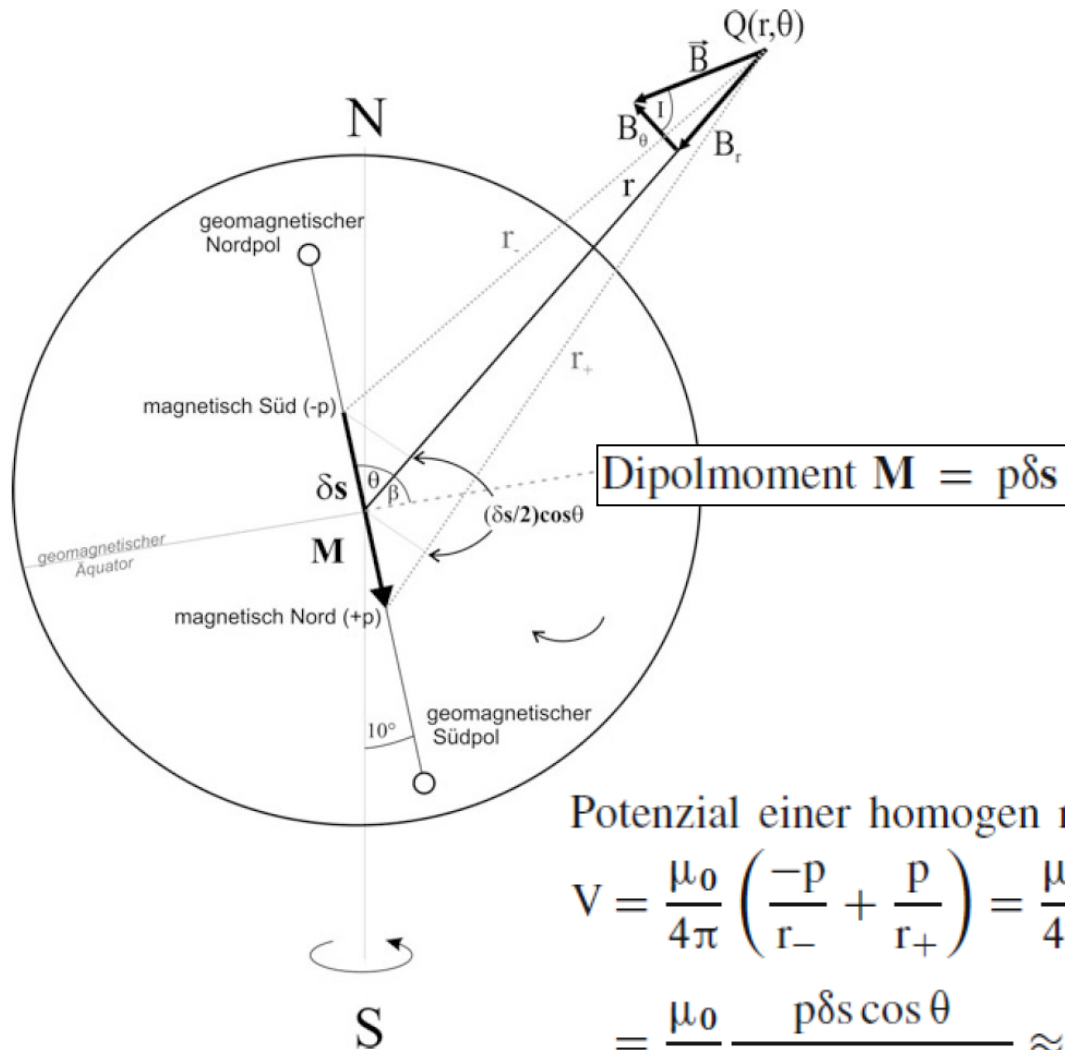


Potenzial einer homogen magnetisierten Kugel

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r + \frac{\delta s}{2} \cos \theta} + \frac{p}{r - \frac{\delta s}{2} \cos \theta} \right)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p\delta s \cos \theta}{r^2 - \left(\frac{\delta s}{2} \cos \theta \right)^2} \quad (\delta s)^2 \ll r^2$$

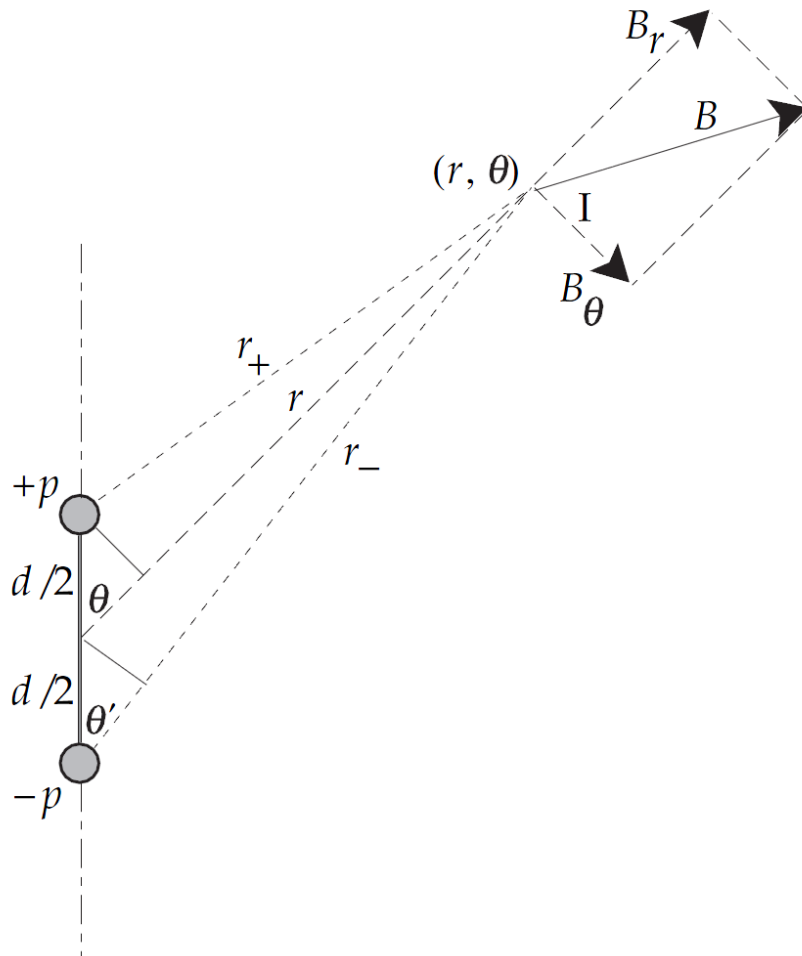
Beschreibung des Dipolfelds



Potenzial einer homogen magnetisierten Kugel

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r + \frac{\delta s}{2} \cos \theta} + \frac{p}{r - \frac{\delta s}{2} \cos \theta} \right) \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p \delta s \cos \theta}{r^2 - \left(\frac{\delta s}{2} \cos \theta \right)^2} \approx \frac{\mu_0}{4\pi r^2} \underbrace{(p \delta s)}_{\mathbf{M}} \cos \theta
 \end{aligned}$$

Beschreibung des Dipolfelds

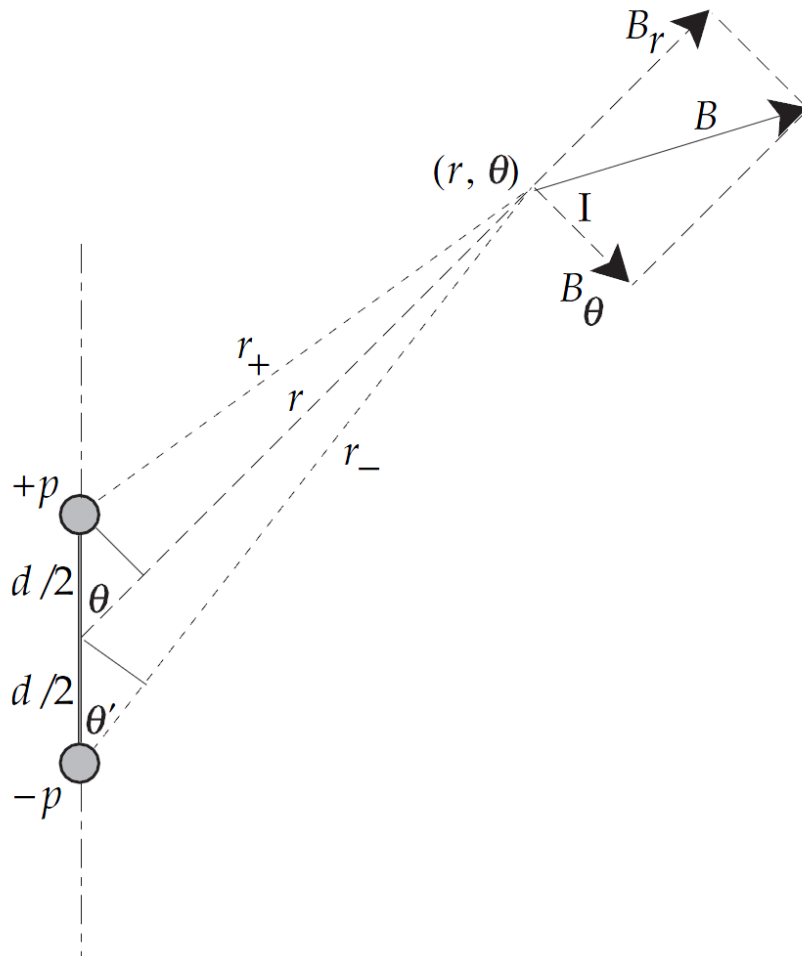


$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

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

Lowrie, 2007

Beschreibung des Dipolfelds

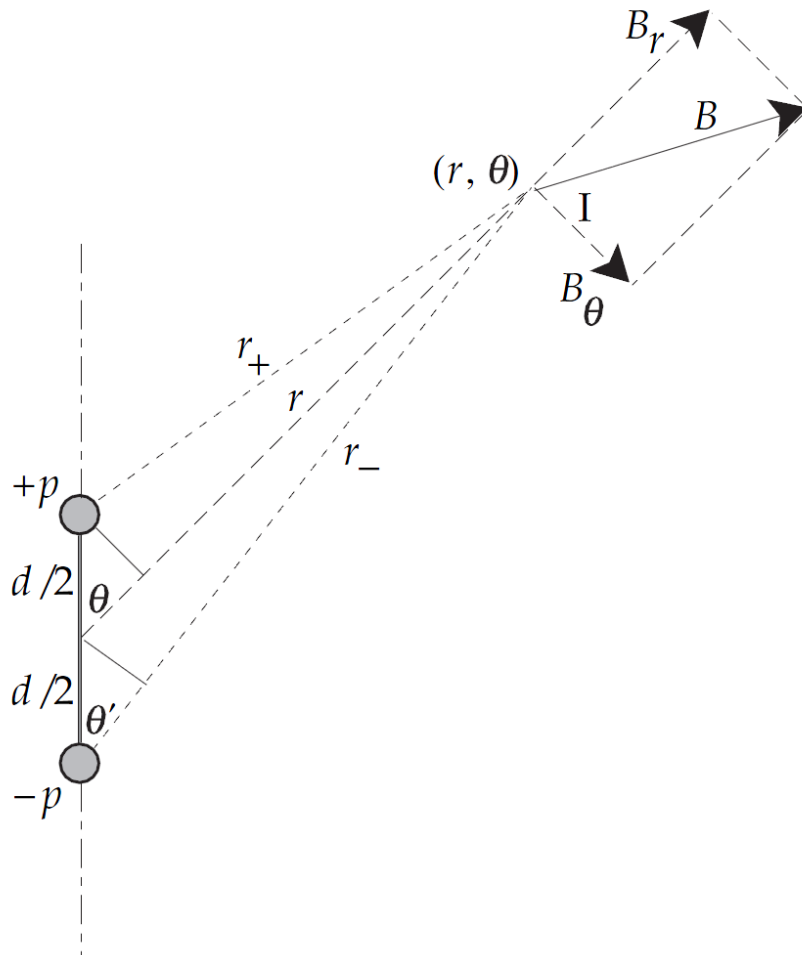


$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) \quad V = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{-p}{r_-} + \frac{p}{r_+} \right)$$

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

Lowrie, 2007

Beschreibung des Dipolfelds



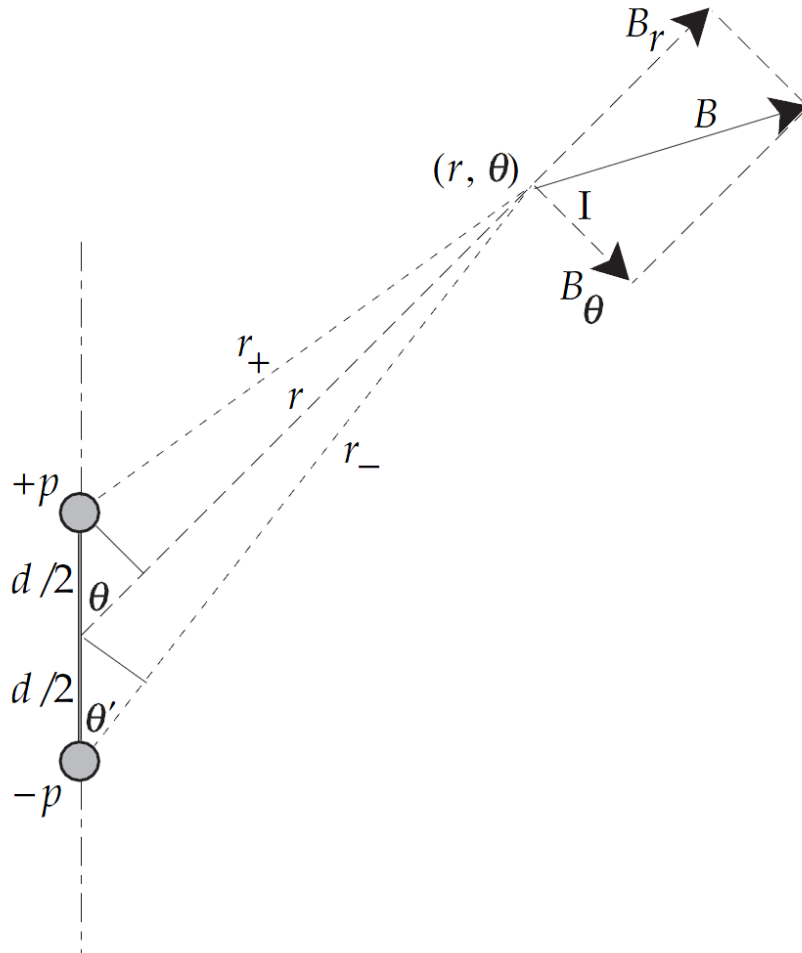
$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

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

mit $d \ll r$ folgt $r_+ \approx r - \frac{d}{2} \cos \theta$

$$r_- \approx r + \frac{d}{2} \cos \theta'$$

Beschreibung des Dipolfelds



$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

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

mit $d \ll r$ folgt $r_+ \approx r - \frac{d}{2} \cos \theta$

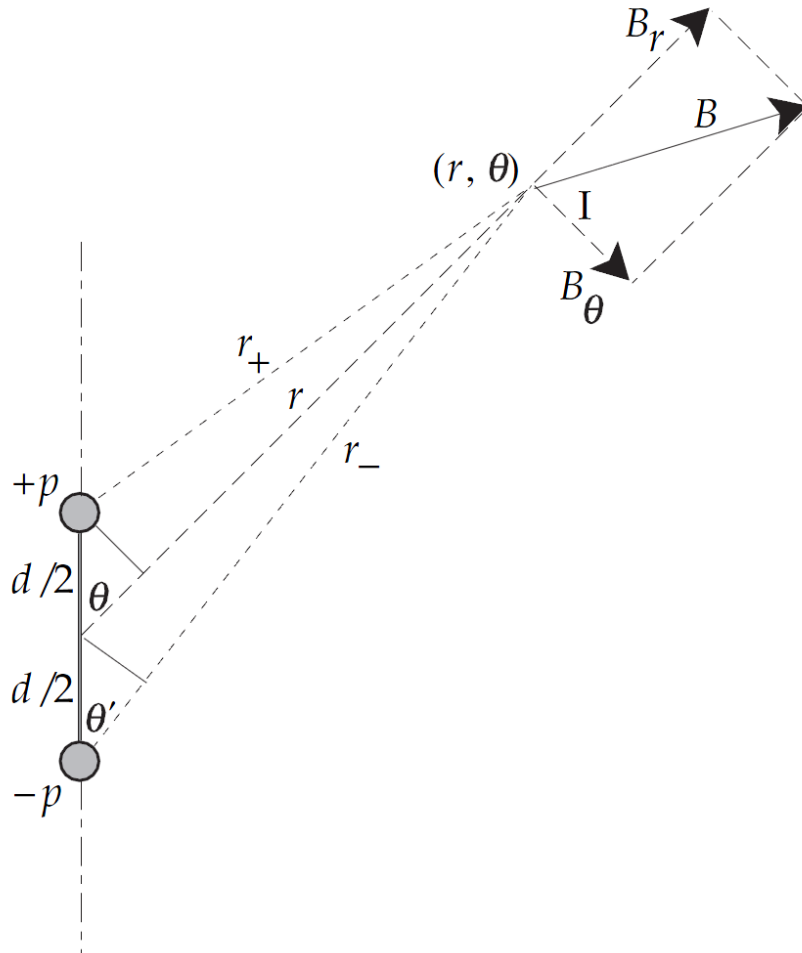
$$r_- \approx r + \frac{d}{2} \cos \theta'$$

mit $\theta \approx \theta'$ folgt

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

$$r_+ r_- \approx r^2 - \frac{d^2}{4} \cos^2 \theta \approx r^2$$

Beschreibung des Dipolfelds



Lowrie, 2007

$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

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

mit $d \ll r$ folgt $r_+ \approx r - \frac{d}{2} \cos \theta$

$$r_- \approx r + \frac{d}{2} \cos \theta'$$

mit $\theta \approx \theta'$ folgt

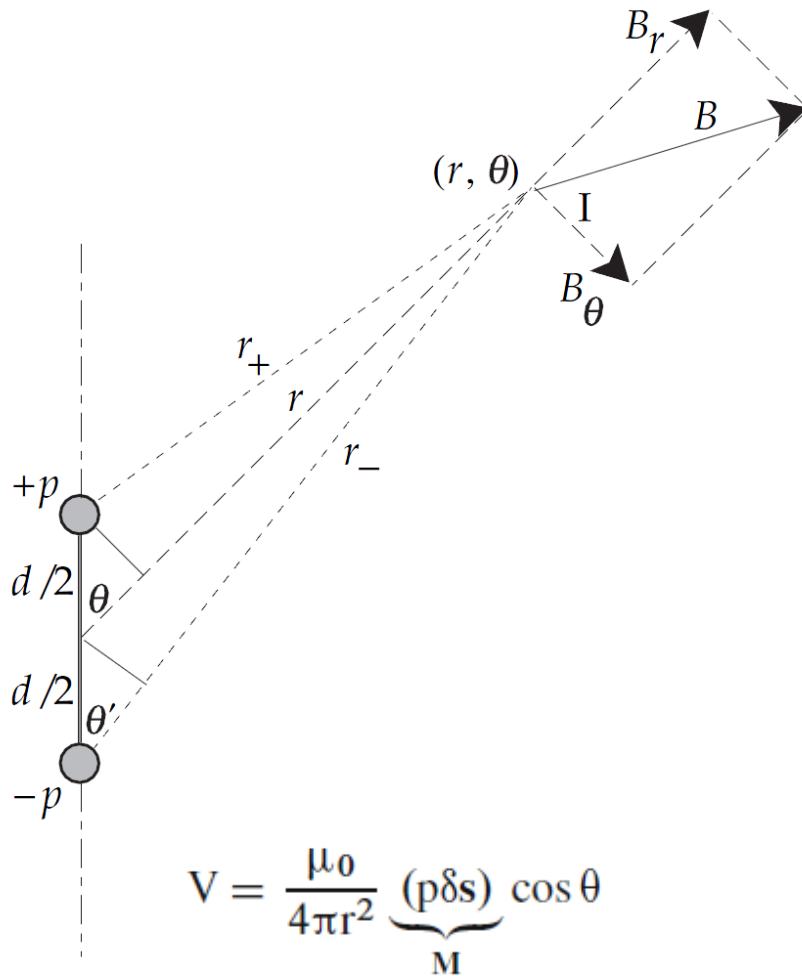
$$r_- - r_+ \approx \frac{d}{2} (\cos \theta' + \cos \theta) \approx d \cos \theta$$

$$r_+ r_- \approx r^2 - \frac{d^2}{4} \cos^2 \theta \approx r^2$$

Einsetzen ergibt

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

Beschreibung des Dipolfelds



Lowrie, 2007

$$W = \frac{\mu_0 p}{4\pi} \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right)$$

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

mit $d \ll r$ folgt $r_+ \approx r - \frac{d}{2} \cos \theta$

$$r_- \approx r + \frac{d}{2} \cos \theta'$$

mit $\theta \approx \theta'$ folgt

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

$$r_+ r_- \approx r^2 - \frac{d^2}{4} \cos^2 \theta \approx r^2$$

Einsetzen ergibt

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

Beschreibung des Dipolfelds

Bestimmung der radialen und azimuthalen Feldkomponenten B_r und B_θ

Ableitungen des Potentials

Clauser, 2015

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} \underbrace{(p\delta s)}_M \cos \theta$$

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\mu_0 M \cos \theta}{2\pi r^3}$$

$$B_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{\mu_0 M \sin \theta}{4\pi r^3}$$

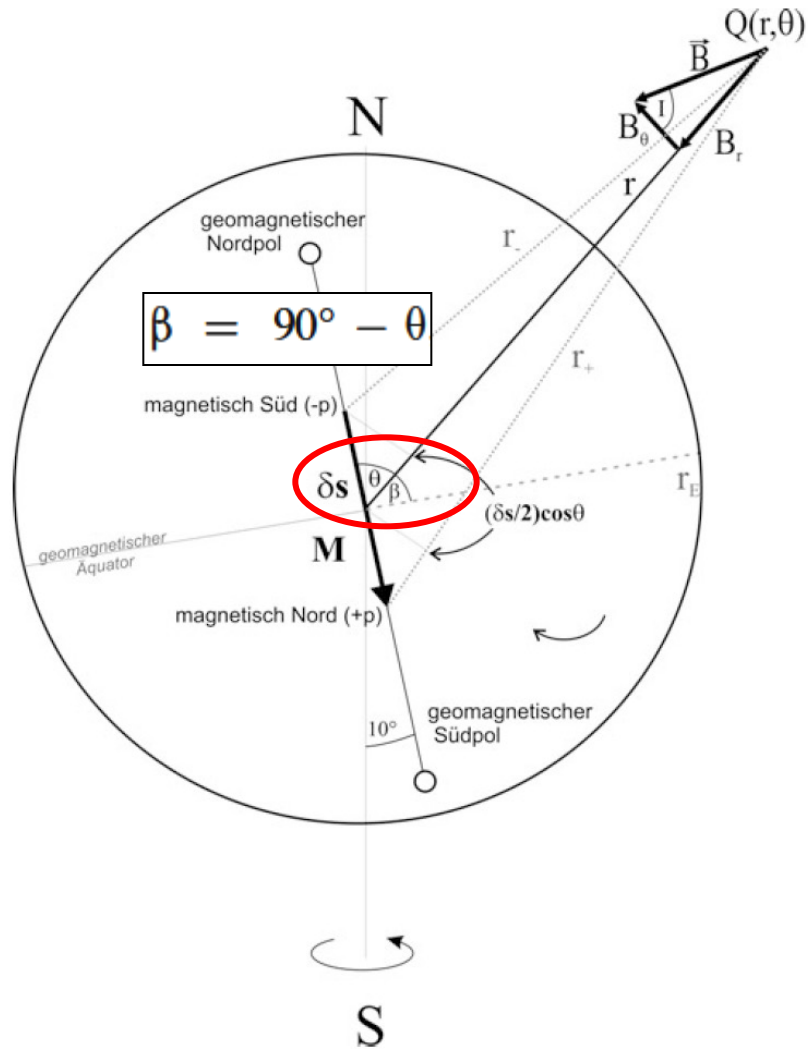
Lowrie, 2007

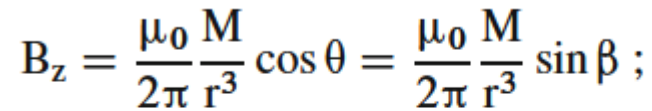
$$W = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(dp) \cos \theta}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m \cos \theta}{r^2}$$

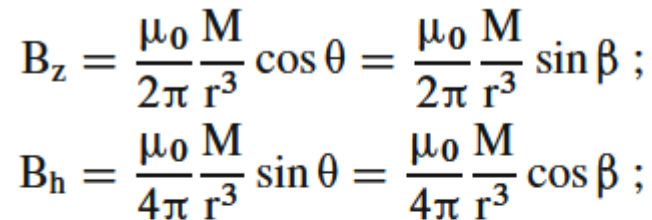
$$B_r = -\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \cos \theta}{r^3}$$

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

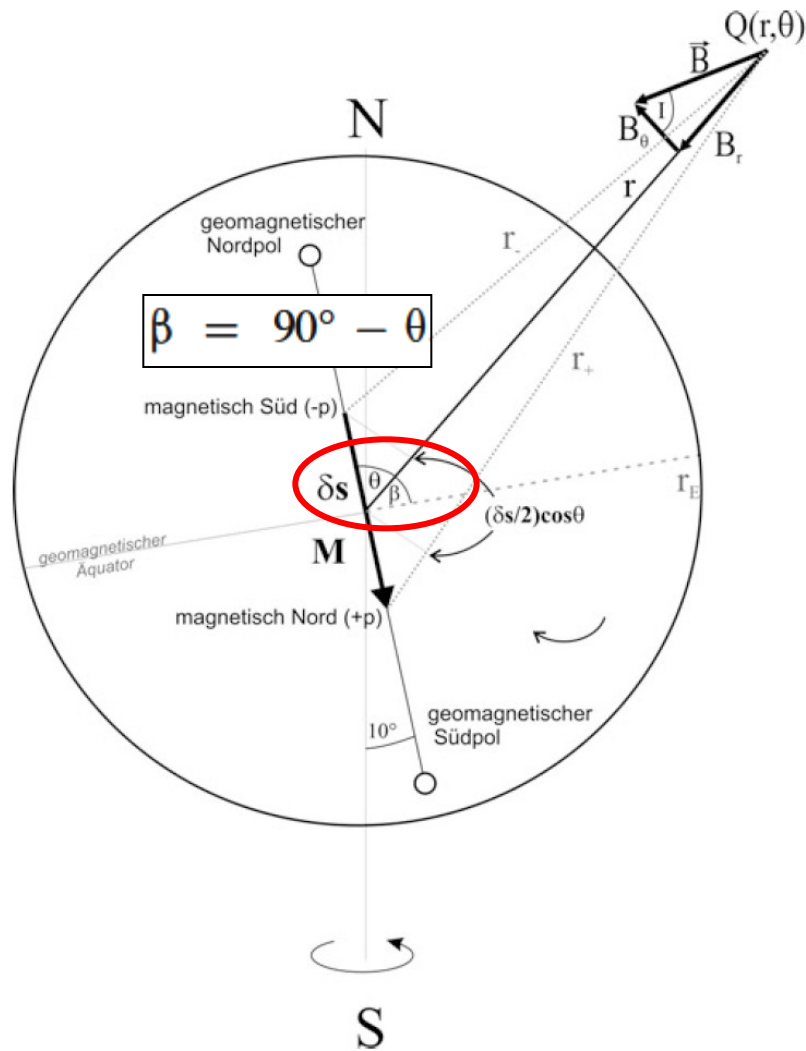
Beschreibung des Dipolfelds







Beschreibung des Dipolfelds

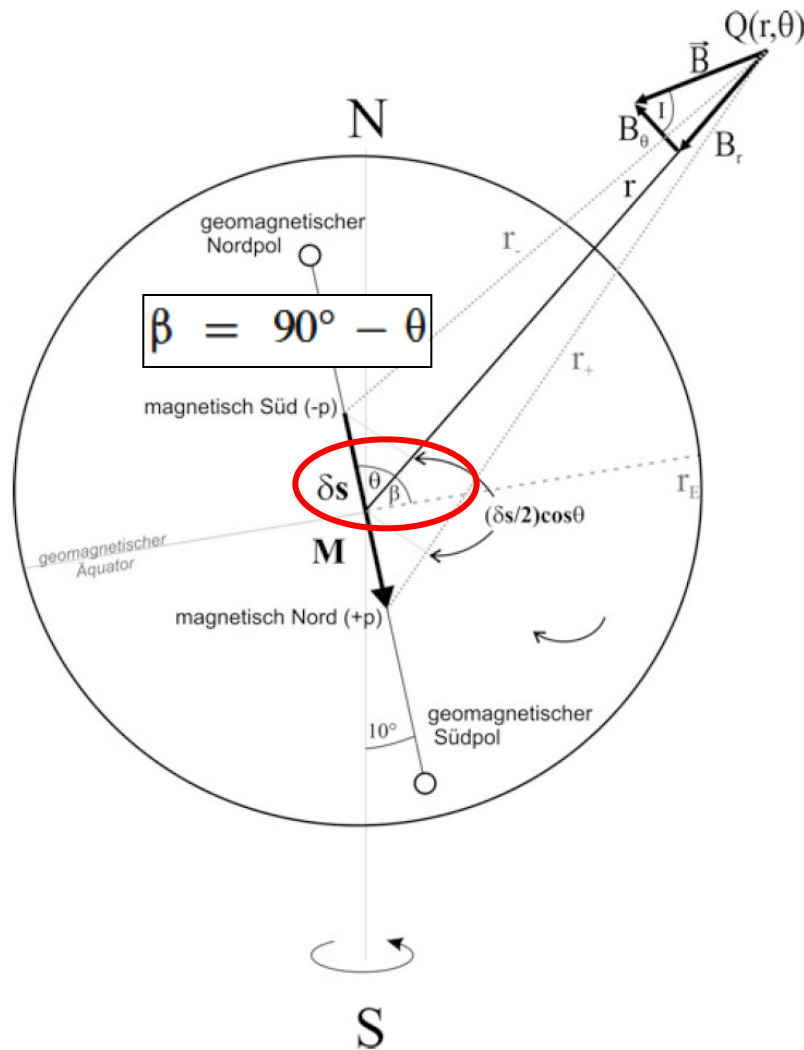


$$B_z = \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \cos \theta = \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \sin \beta ;$$

$$B_h = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sin \theta = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta ;$$

$$\tan I = \frac{B_z}{B_h} = 2 \cot \theta = 2 \tan \beta ;$$

Beschreibung des Dipolfelds



$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{r^3} \cos \theta = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{r^3} \sin \beta ;$$

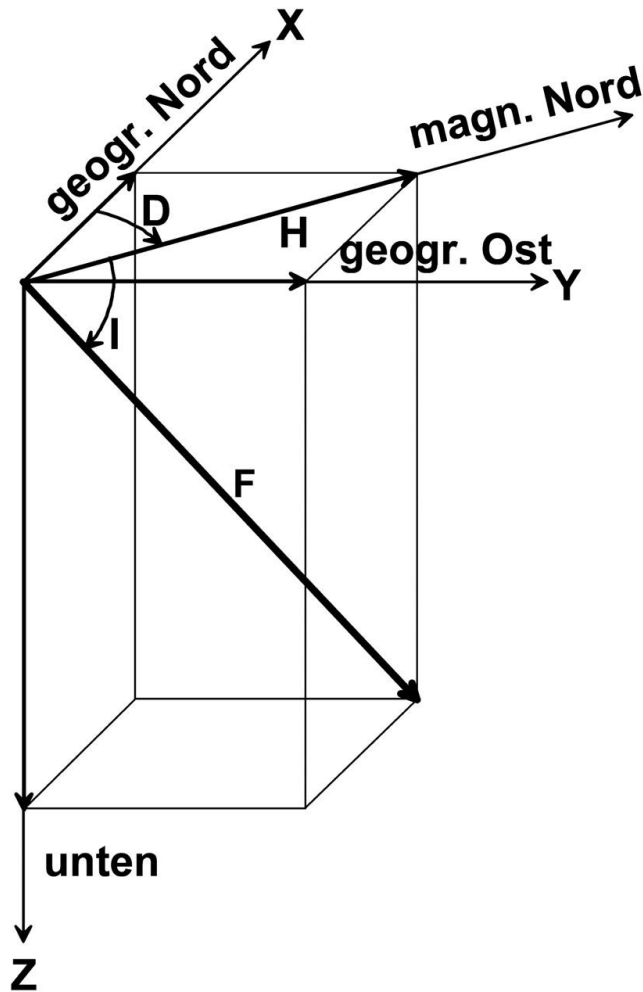
$$B_h = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} \sin \theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} \cos \beta ;$$

$$\tan I = \frac{B_z}{B_h} = 2 \cot \theta = 2 \tan \beta ;$$

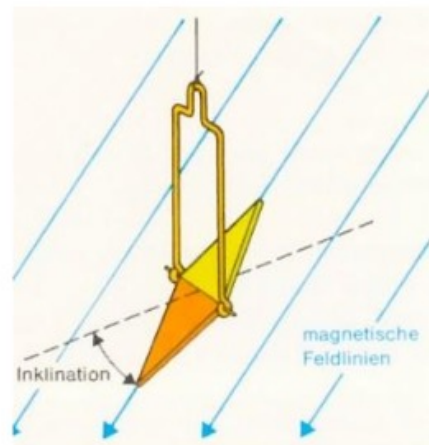
$$B = \sqrt{B_z^2 + B_h^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} \underbrace{(1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2}}_{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta + 3 \cos^2 \theta}$$

Erdmagnetfeld

Zerlegung in Komponenten



- F: Betrag des Erdmagnetfeldvektors
- H: Betrag der Horizontalkomponente
- Z: Betrag der Vertikalkomponente
- D: Deklination (Winkel)
- I: Inklination (Winkel)

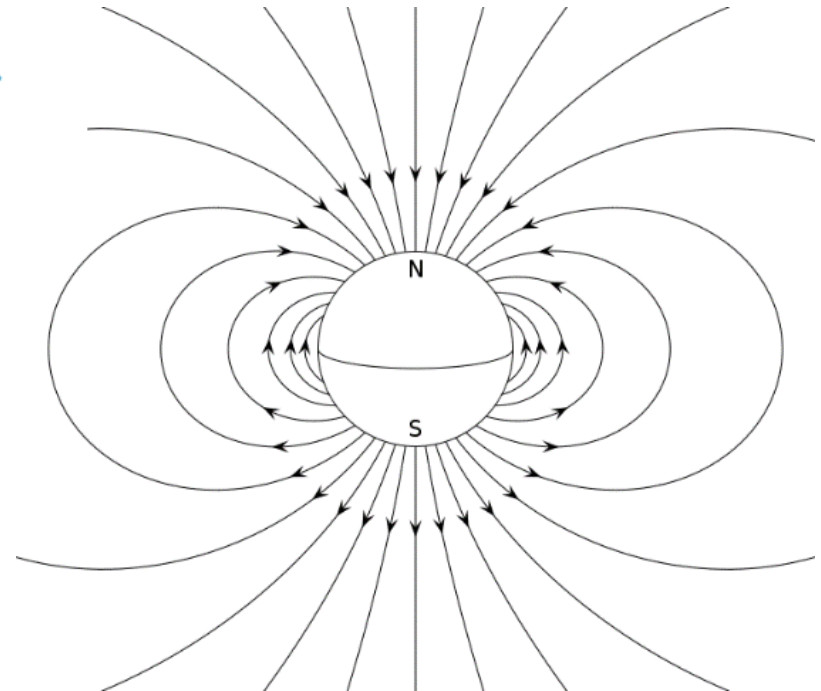


Stolle, 2015

Am magnetischen Pol ($\theta = 0^\circ$) und am Äquator ($\theta = 90^\circ$) verschwindet jeweils eine der beiden Komponenten:

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

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

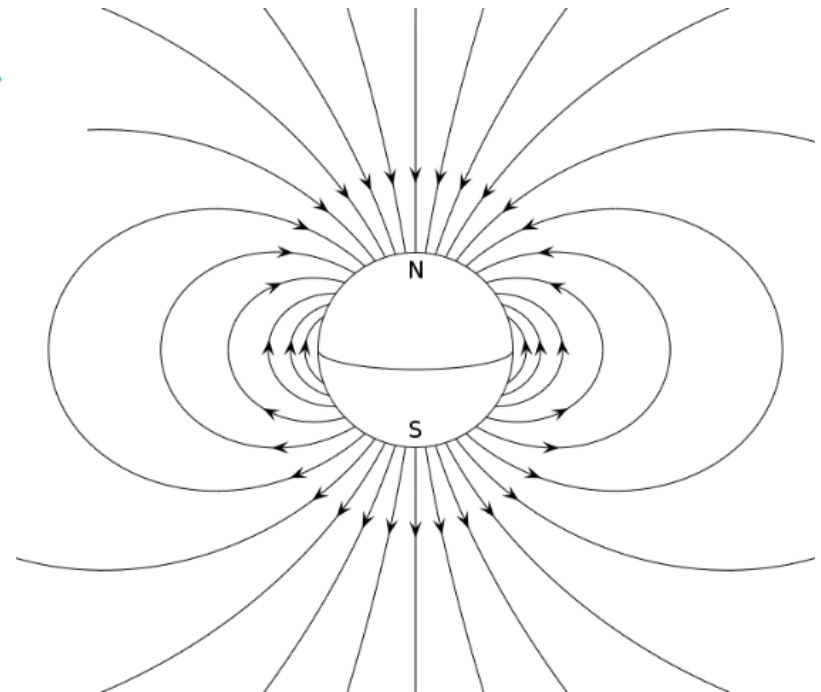


Am magnetischen Pol ($\theta = 0^\circ$) und am Äquator ($\theta = 90^\circ$) verschwindet jeweils eine der beiden Komponenten:

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

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

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



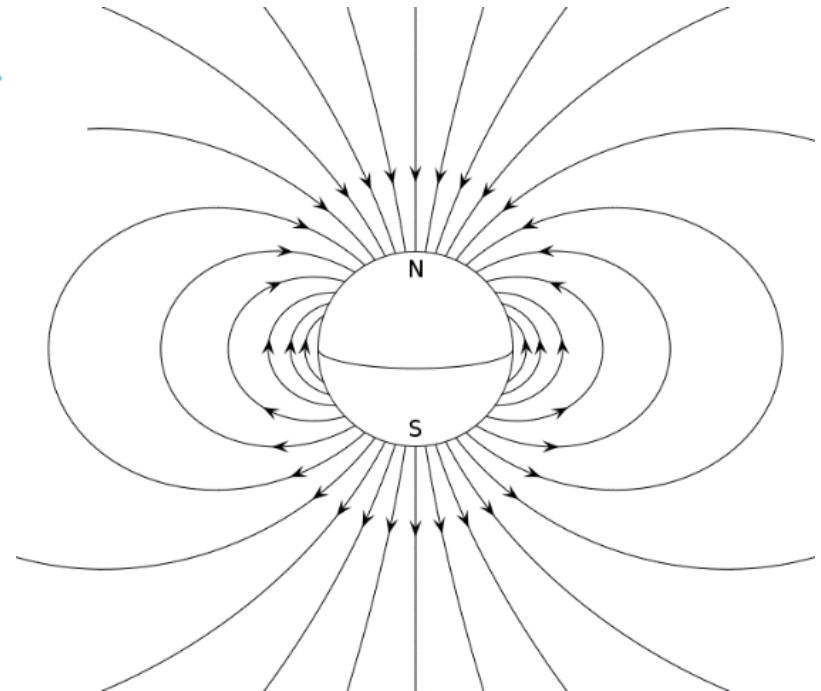
Am magnetischen Pol ($\theta = 0^\circ$) und am Äquator ($\theta = 90^\circ$) verschwindet jeweils eine der beiden Komponenten:

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

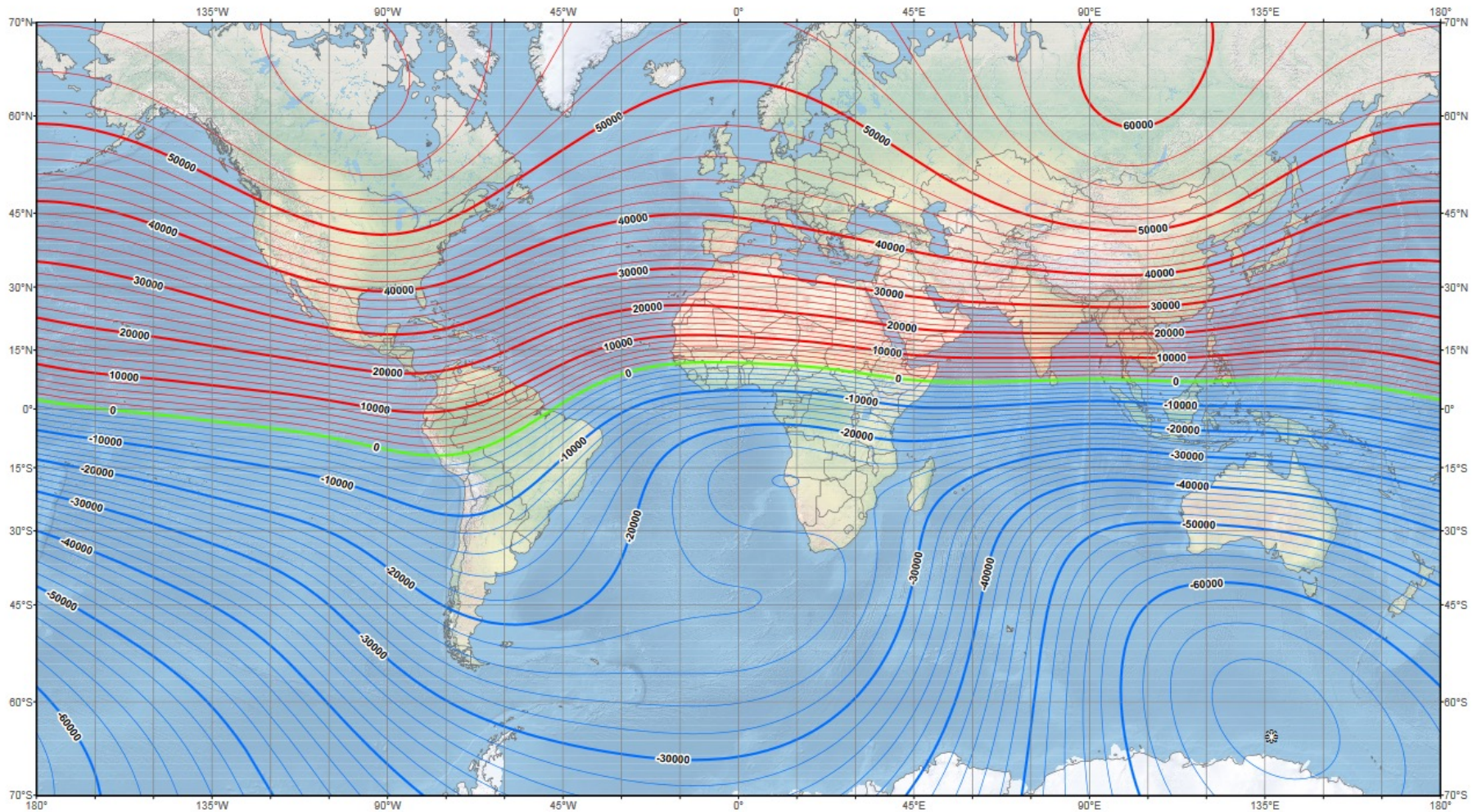
$$\theta = 90^\circ \text{ und } \beta = 0^\circ : B_z^{\text{Äq.}} = 0 \text{ und } B_h^{\text{Äq.}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} .$$

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

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



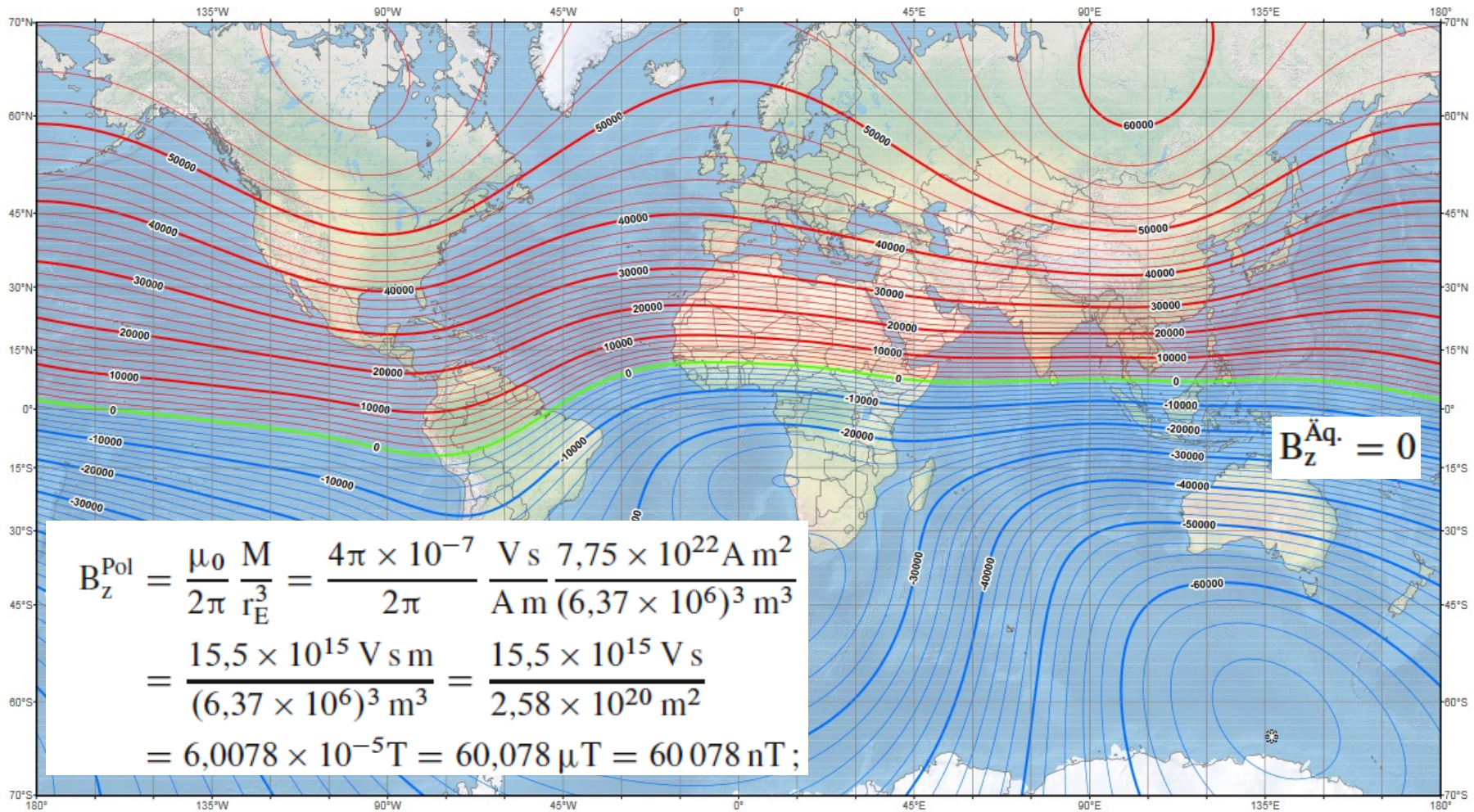
Main Field Down Component (Z)



Main field down component (Z)
Contour interval: 2000 nT, red contours positive (down); blue negative (up); green zero line.
Mercator Projection.
© 2014, Department of the Interior

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Main Field Down Component (Z)

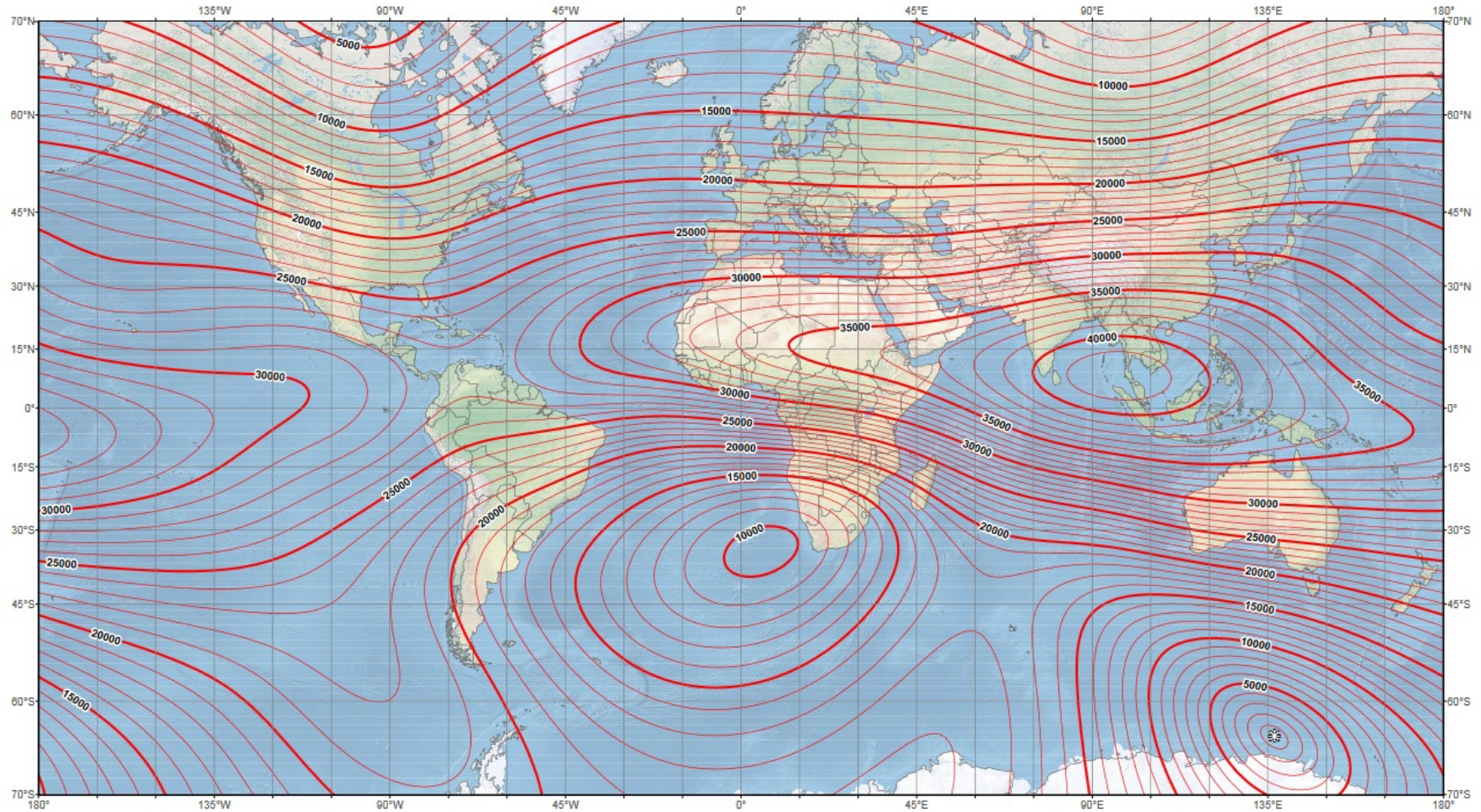


$$\begin{aligned}
 B_z^{\text{Pol}} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{r_E^3} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Am}} \frac{7,75 \times 10^{22} \text{ Am}^2}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{ m}^3} \\
 &= \frac{15,5 \times 10^{15} \text{ Vs m}}{(6,37 \times 10^6)^3 \text{ m}^3} = \frac{15,5 \times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

Main field down component (Z)
Contour interval: 2000 nT, red contours positive (down); blue negative (up); green zero line.
Mercator Projection.
© - Position of this scale

Map developed by NOAA/NGDC & CIRC
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

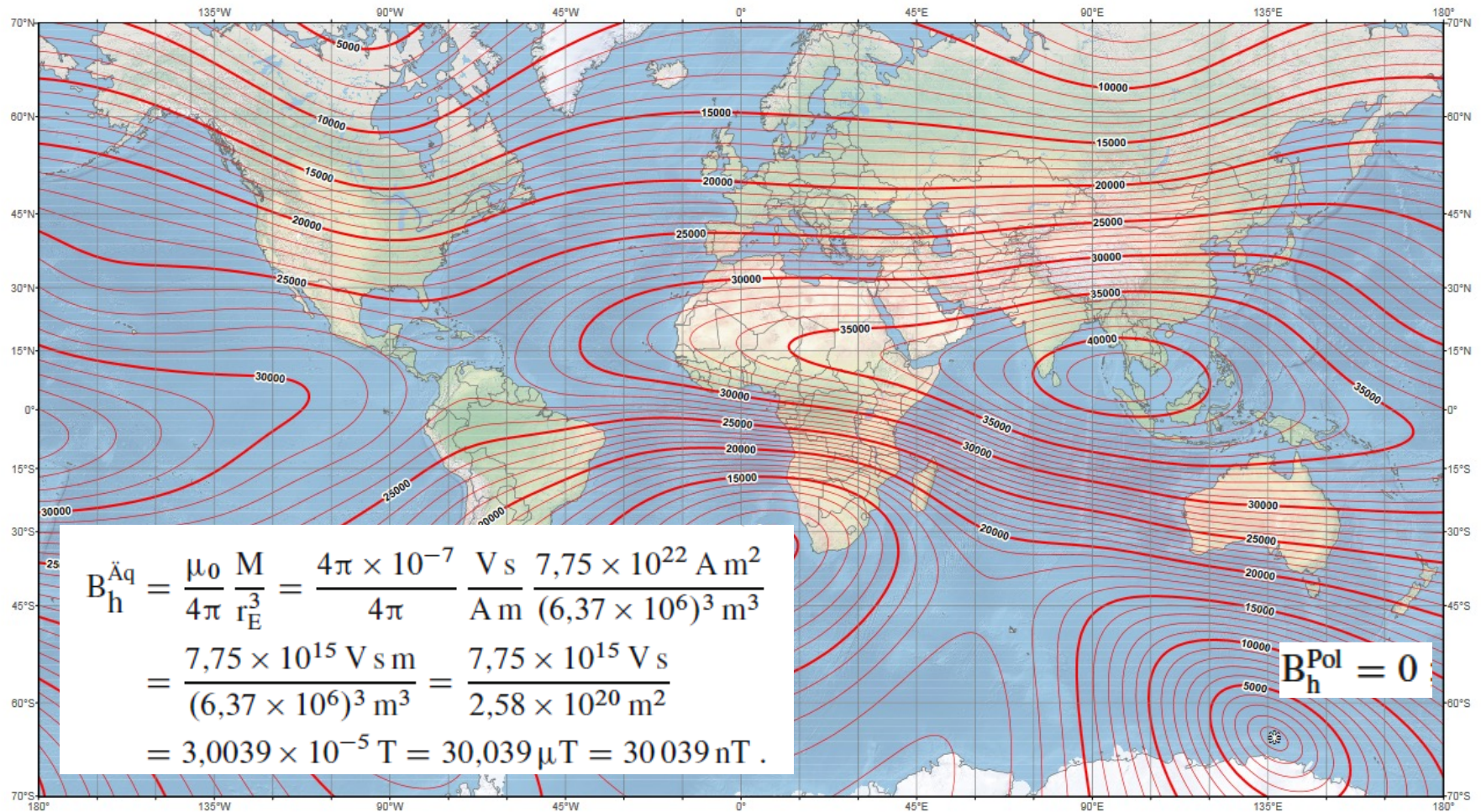
Main Field Horizontal Intensity (H)



Main field horizontal intensity (H)
Contour interval: 1000 nT.
Mercator Projection.
☉: Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Main Field Horizontal Intensity (H)



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

$$B_h^{\text{Pol}} = 0$$

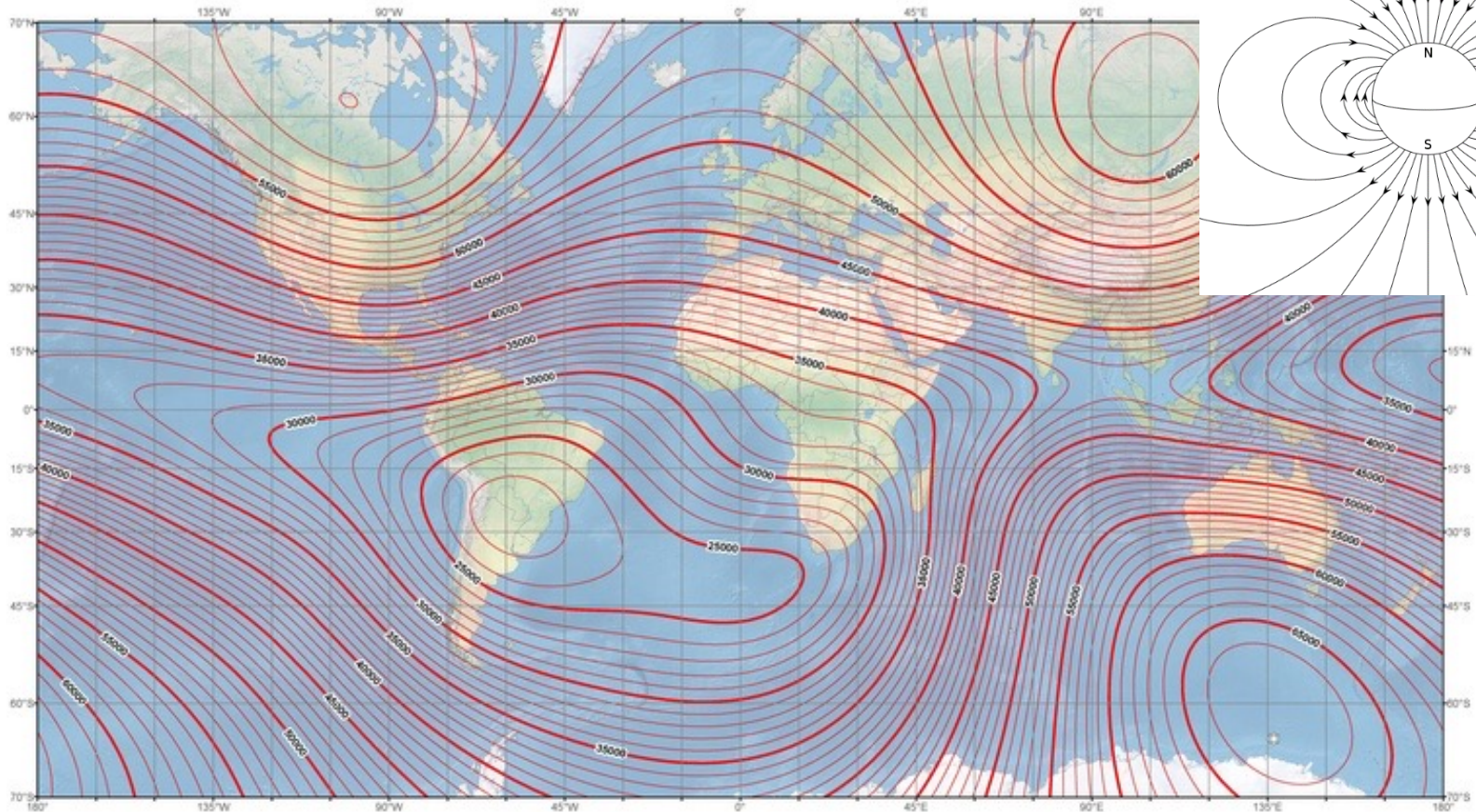
Main field horizontal intensity (H)
Contour interval: 1000 nT.
Mercator Projection.
Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Erdmagnetfeld

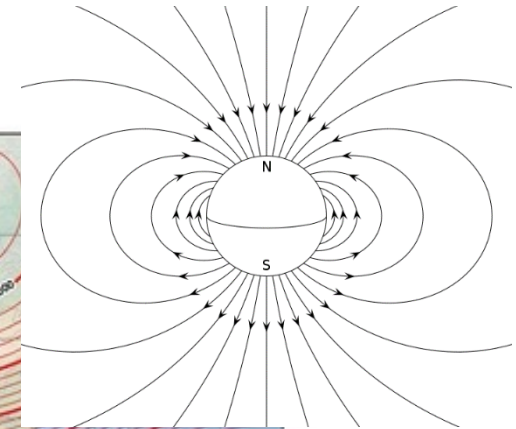
Magnetische Feldstärke (Betrag) an der Erdoberfläche

Main Field Total Intensity (F)



Main Field Total Intensity (F)
Contour interval: 1000 nT
Mercator Projection
2°: Position of dip poles

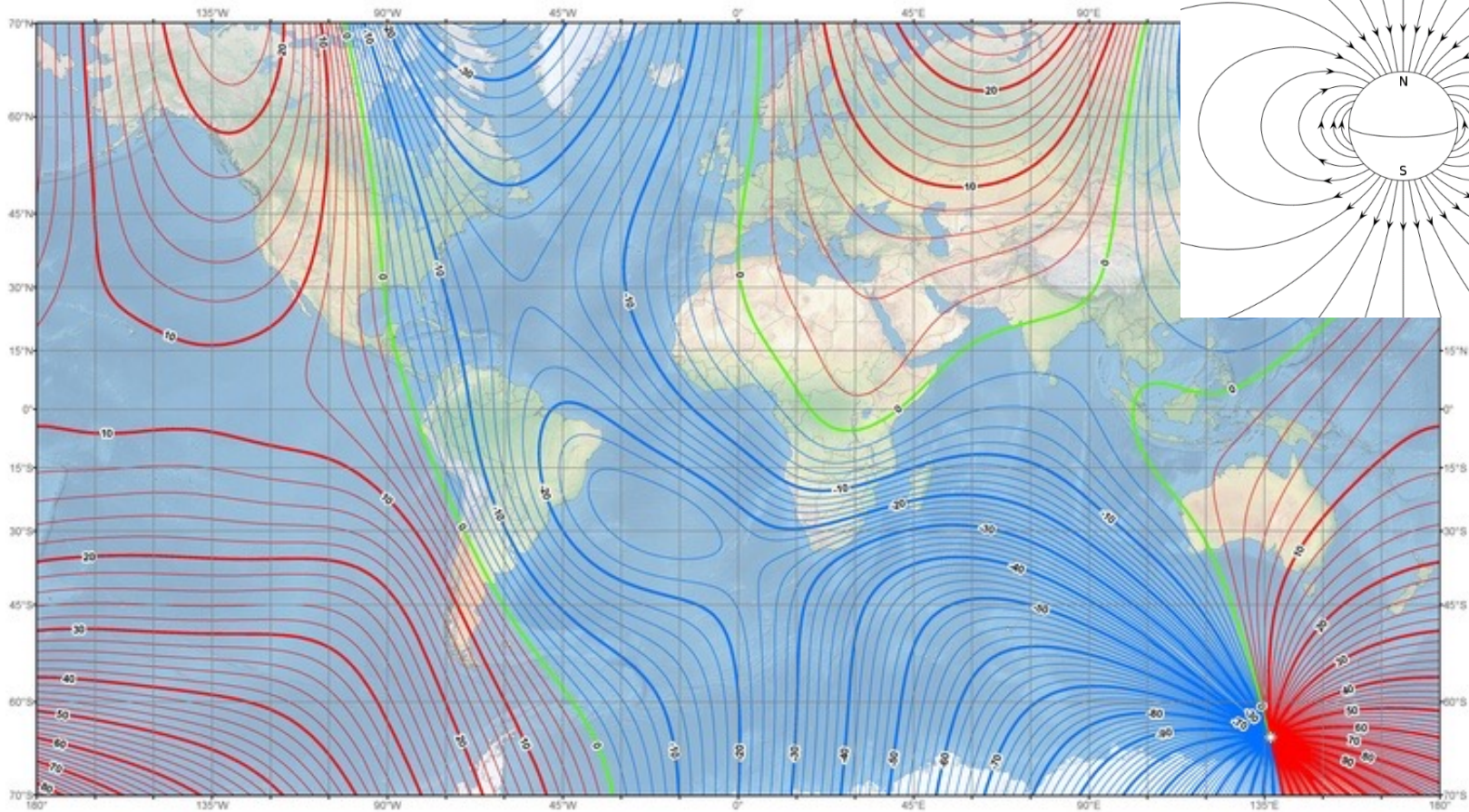
Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014



Erdmagnetfeld

Deklination an der Erdoberfläche

Main Field Declination (D)



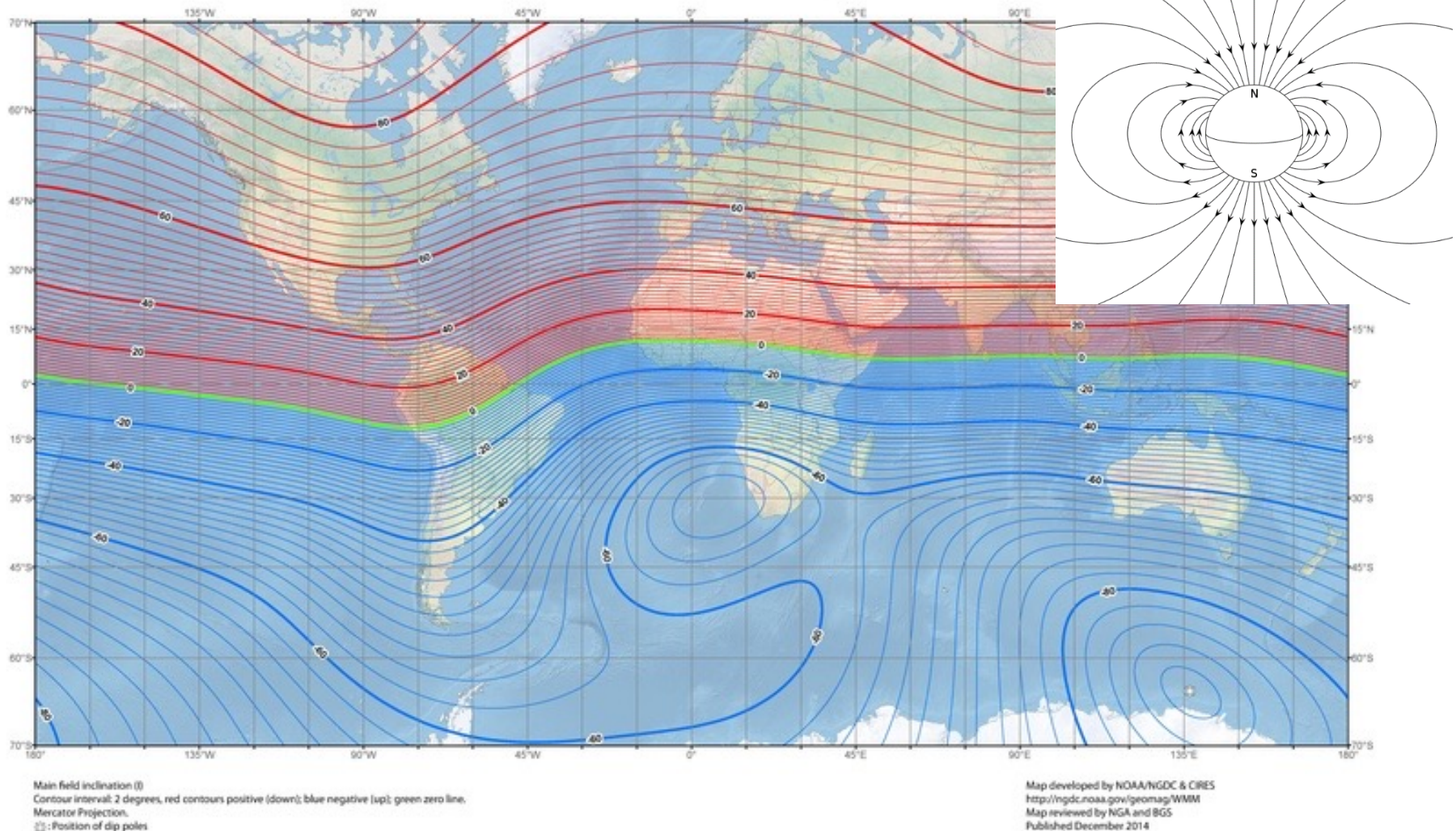
Main field declination (D)
Contour interval: 2 degrees, red contours positive (east); blue negative (west); green (agonic) zero line.
Mercator Projection.
[Symbol] : Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CRES
<http://mgdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Erdmagnetfeld

Inklination an der Erdoberfläche

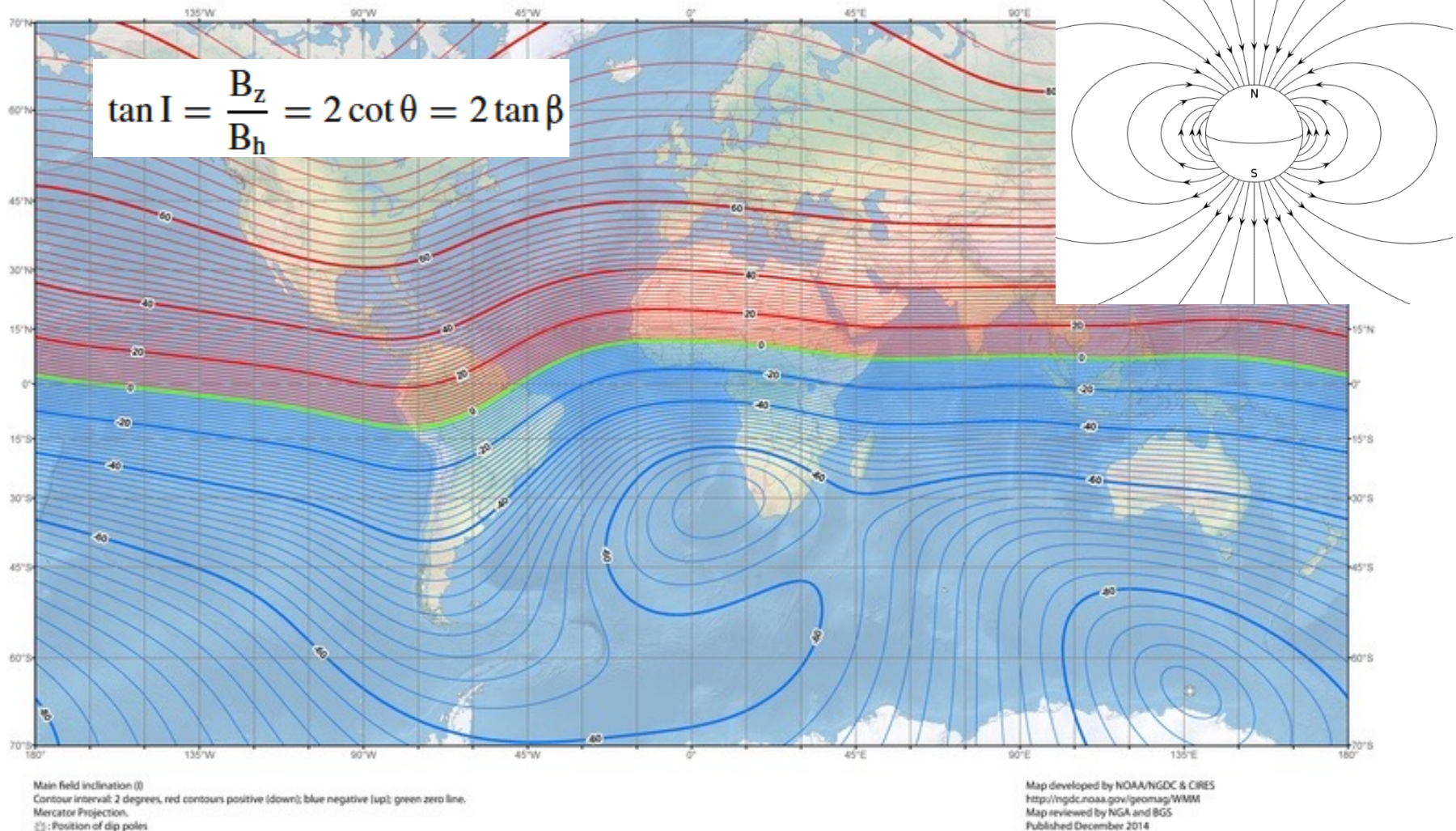
Main Field Inclination (I)



Erdmagnetfeld

Inklination an der Erdoberfläche

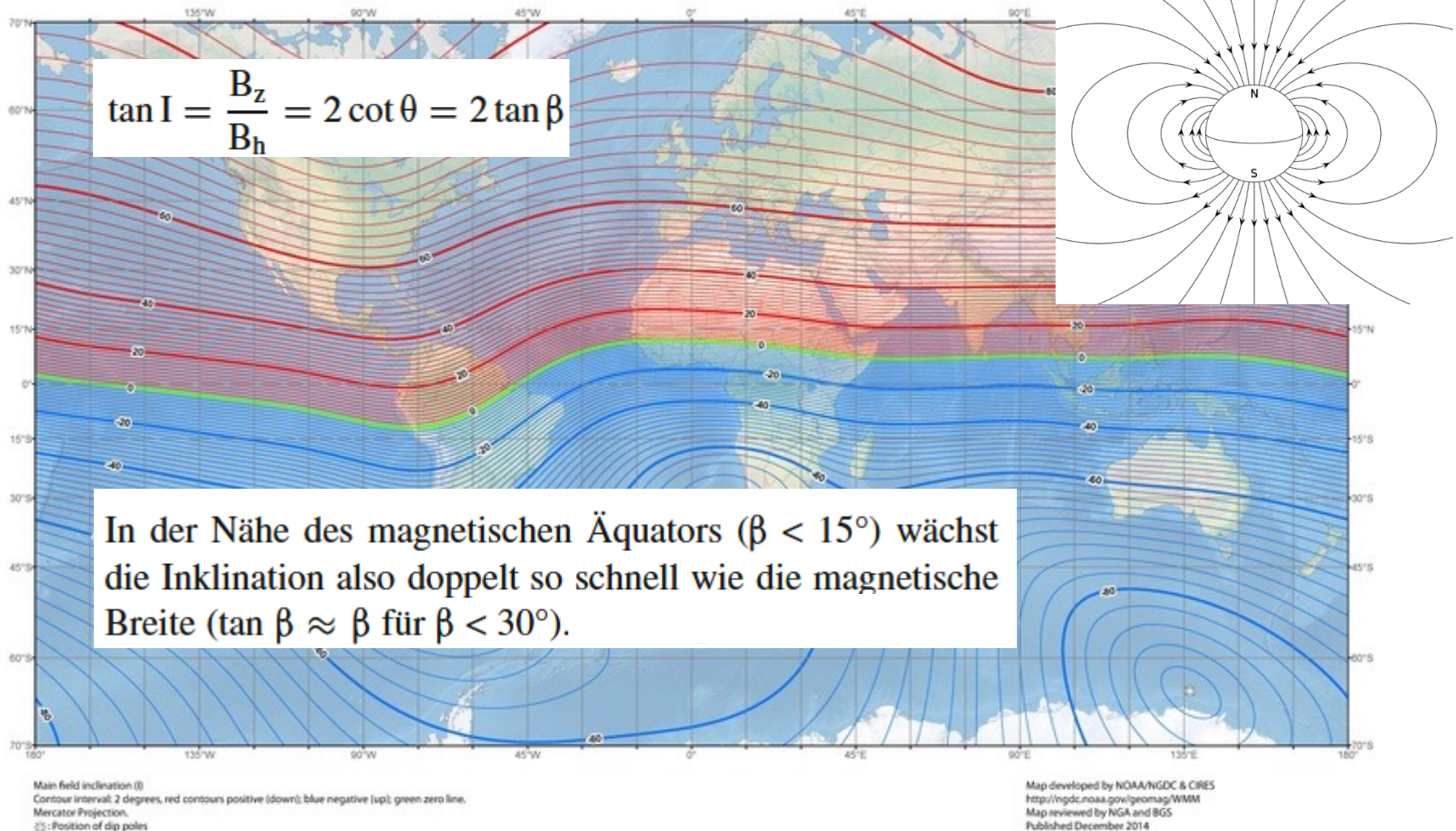
Main Field Inclination (I)



Erdmagnetfeld

Inklination an der Erdoberfläche

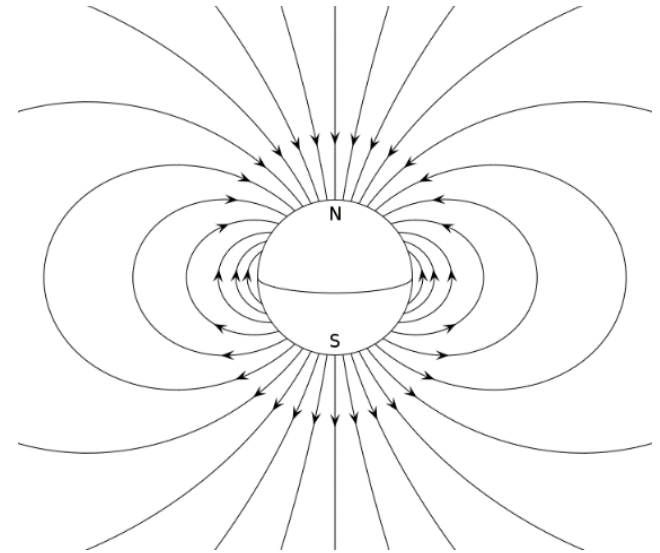
Main Field Inclination (I)



Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.



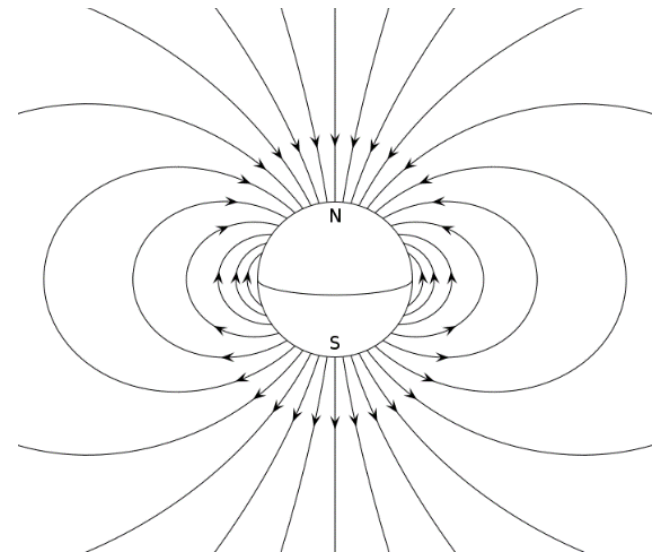
Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.

Änderung mit der Höhe h

Setze $r = r_E + h$



Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

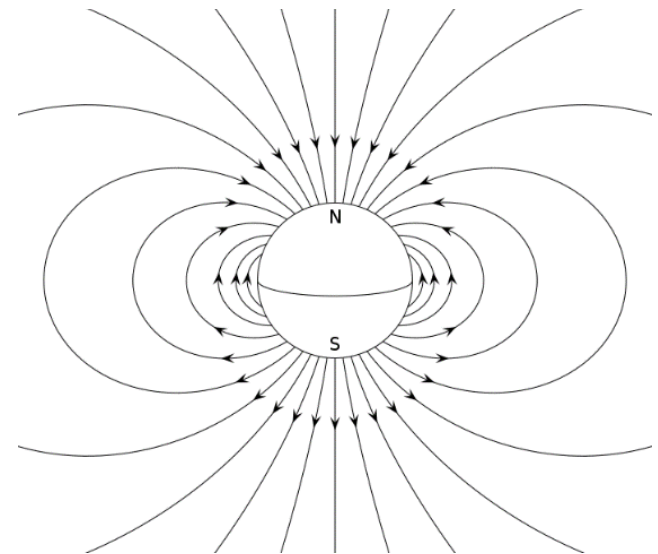
Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.

Änderung mit der Höhe h

Setze $r = r_E + h$

Potenzreihenentwicklung für

$$B(r_E + h) \approx B_0 \left(1 - 3(h/r_E) + 6(h/r_E)^2 + \dots \right)$$



Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.

Änderung mit der Höhe h

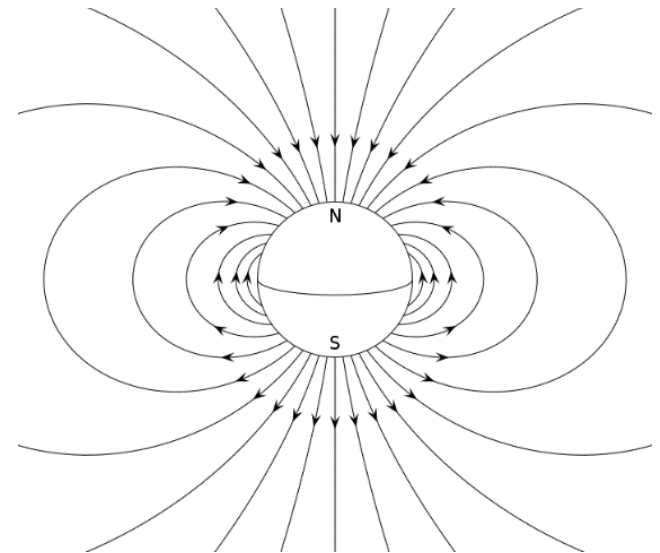
Setze $r = r_E + h$

Potenzreihenentwicklung für

$$B(r_E + h) \approx B_0 \left(1 - 3(h/r_E) + 6(h/r_E)^2 + \dots \right)$$

Somit folgt für $h = 1 \text{ km}$:

$$\begin{aligned} B(r_E + 10^3) &\approx B_0 \left(1 - \frac{3000}{6,37 \times 10^6} \right) \\ &= B_0 (1 - 0,47 \times 10^{-3}) \approx 0,999\,53\,B_0 \end{aligned}$$



Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.

Änderung mit der Höhe h

Setze $r = r_E + h$

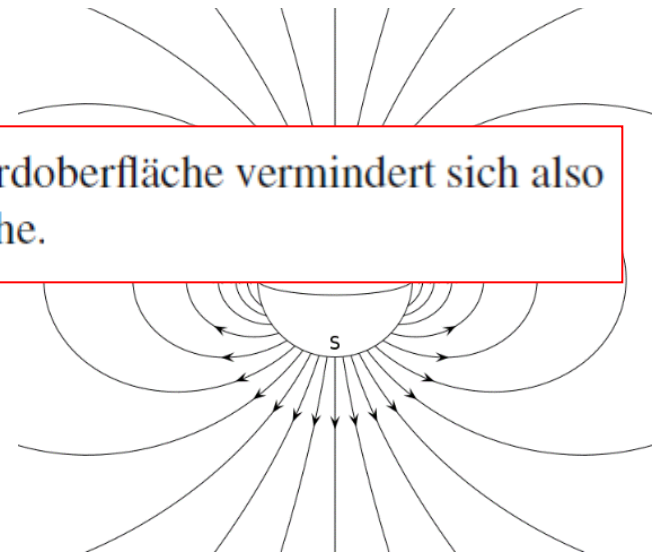
Potenzreihenentwicklung für

$$B(r_E + h) \approx B_0 \left(1 - 3(h/r_E) + 6(h/r_E)^2 + \dots \right)$$

Somit folgt für $h = 1 \text{ km}$:

$$\begin{aligned} B(r_E + 10^3) &\approx B_0 \left(1 - \frac{3000}{6,37 \times 10^6} \right) \\ &= B_0 (1 - 0,47 \times 10^{-3}) \approx 0,999\,53\,B_0 \end{aligned}$$

Die Feldstärke B_0 an der Erdoberfläche vermindert sich also um ca. $1/2 \text{ ‰}$ pro km Höhe.



Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Die Größe der Elemente des Erdmagnetfelds ändert sich entsprechend dem überwiegenden Dipolcharakter des Felds sowohl mit der Höhe h über der Erdoberfläche als auch mit der Breite.

Änderung mit der Höhe h

Setze $r = r_E + h$

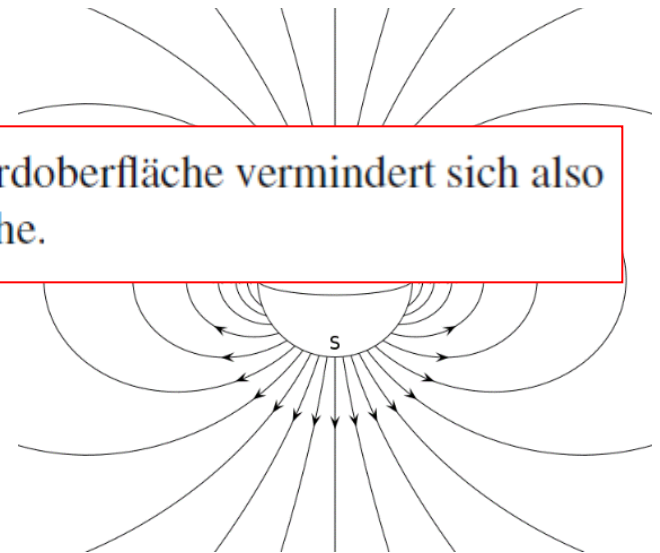
Potenzreihenentwicklung für

$$B(r_E + h) \approx B_0 \left(1 - 3(h/r_E) + 6(h/r_E)^2 + \dots \right)$$

Somit folgt für $h = 1 \text{ km}$:

$$\begin{aligned} B(r_E + 10^3) &\approx B_0 \left(1 - \frac{3000}{6,37 \times 10^6} \right) \\ &= B_0 (1 - 0,47 \times 10^{-3}) \approx 0,999\,53\,B_0 \end{aligned}$$

Die Feldstärke B_0 an der Erdoberfläche vermindert sich also um ca. $1/2 \text{ ‰}$ pro km Höhe.



Dies gilt analog auch für B_h und B_z .

Aufgabe auf Übungsblatt

Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Änderung mit der Breite β

$$\begin{aligned} B_{z,\beta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \beta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \sin \beta \right) \\ &= \frac{1}{r} \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \cos \beta = \frac{2}{r} \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta \right) = \frac{2}{r} B_h \end{aligned}$$

Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Änderung mit der Breite β

$$\begin{aligned} B_{z,\beta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \beta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \sin \beta \right) \\ &= \frac{1}{r} \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \cos \beta = \frac{2}{r} \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta \right) = \frac{2}{r} B_h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{h,\beta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial B_h}{\partial \beta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta \right) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sin \beta = -\frac{B_z}{2r} \end{aligned}$$

Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Änderung mit der Breite β

$$\begin{aligned}
 B_{z,\beta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial \beta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \sin \beta \right) \\
 &= \frac{1}{r} \frac{\mu_0 M}{2\pi r^3} \cos \beta = \frac{2}{r} \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta \right) = \frac{2}{r} B_h
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{h,\beta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial B_h}{\partial \beta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \cos \beta \right) \\
 &= -\frac{1}{r} \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} \sin \beta = -\frac{B_z}{2r}
 \end{aligned}$$

Für einen Punkt an der Erdoberfläche mit $B_h(r_E) = 20\,000 \text{ nT}$, also nach (5.25) in etwa 50° Breite, gilt somit:
 $B_{z,\beta} = 2 \frac{B_h}{r_E} 2 \frac{20\,000}{6,376} \approx 0,006\,28 \text{ nTm}^{-1} = 6,28 \text{ nT km}^{-1}.$

Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Tab. 5.4 Änderungen der magnetischen Feldelemente B , B_h , und B_z mit der Höhe und der magnetischen Breite

	Feldstärke (nT) (für $\beta = 50^\circ$ N)	Feldänderung mit der Höhe (nT km ⁻¹)	Feldänderung mit der Breite (nach Norden) (nT km ⁻¹)
B	52 400	-24,7	4,40
B_h	20 300	-9,6	-3,79
B_z	48 300	-22,7	6,28

Erdmagnetfeld

Räumliche Änderung der Komponenten

Tab. 5.4 Änderungen der magnetischen Feldelemente B , B_h , und B_z mit der Höhe und der magnetischen Breite

	Feldstärke (nT) (für $\beta = 50^\circ$ N)	Feldänderung mit der Höhe (nT km ⁻¹)	Feldänderung mit der Breite (nach Norden) (nT km ⁻¹)
B	52 400	-24,7	4,40
B_h	20 300	-9,6	-3,79
B_z	48 300	-22,7	6,28

Wie misst man das Erdmagnetfeld?

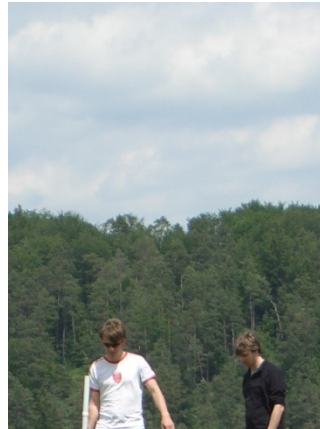
Kleinräumige Messung des Erdmagnetfelds

→ Einführung in die Geophysik 1



Kleinräumige Messung des Erdmagnetfelds

→ Einführung in die Geophysik 1



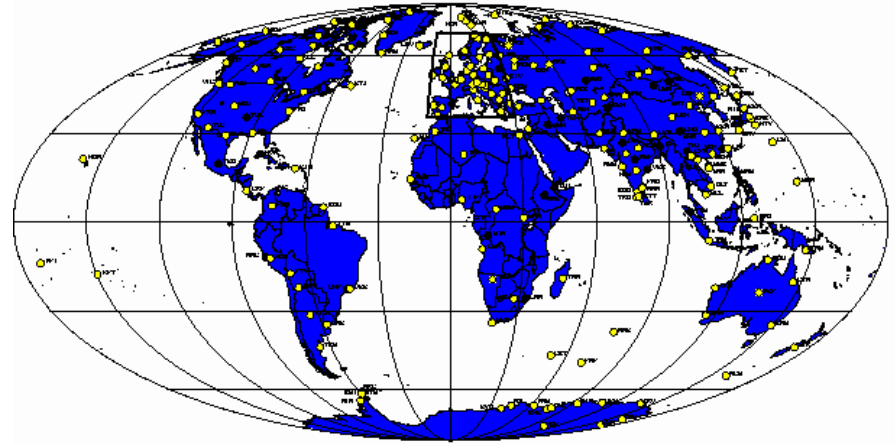
Messung eines Anomaliefelds
Änderung des Erdmagnetfelds im Messgebiet vernachlässigbar



Kontinuierliche Registrierung des Erdmagnetfelds



Geomagnetisches Observatorium
Niemeck des GFZ bei Potsdam



Observatorien



Erdmagnetfeld

Messung

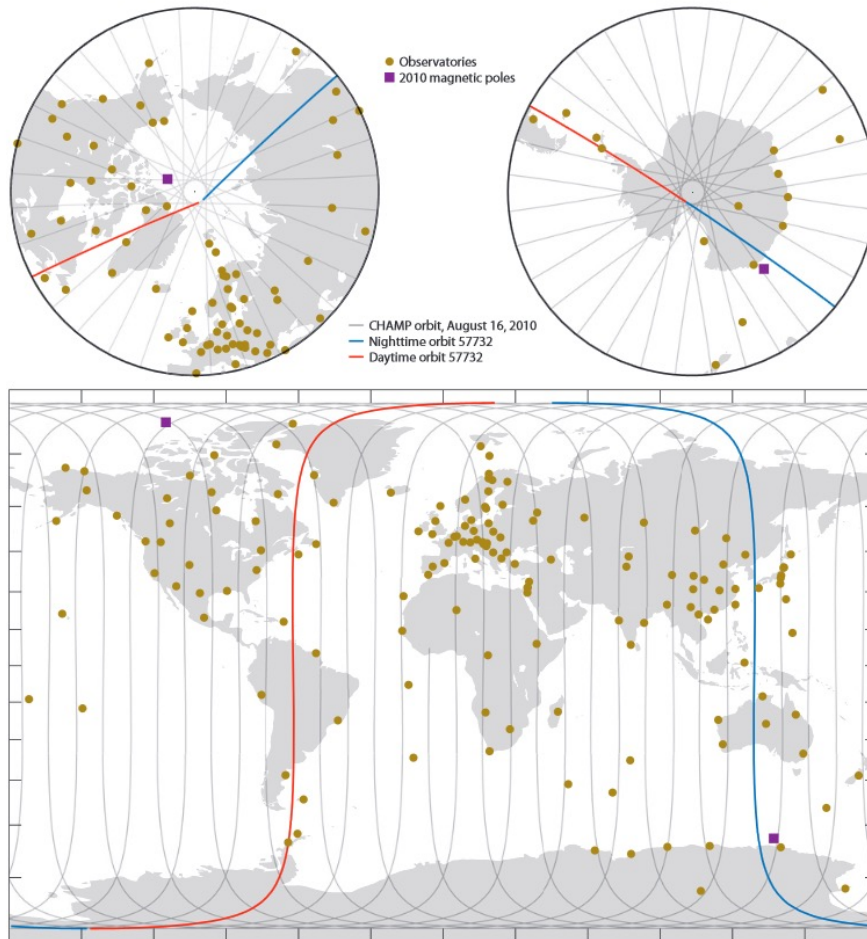


Figure 1

Ground track of 24 h of the CHAMP satellite orbit on August 16, 2010 (*multiple gray curves*). Highlighted is one particular orbit (orbit number 57732), when the satellite starts close to the geographic North pole and flies southward during local nighttime conditions (*blue curve*). After approximately 45 min, it reaches its closest approach to the geographic South pole and moves northward on the dayside (*red curve*). Dark yellow dots indicate the locations of ground-based magnetic observatories. Locations of the magnetic poles in 2010 are shown by the purple squares.

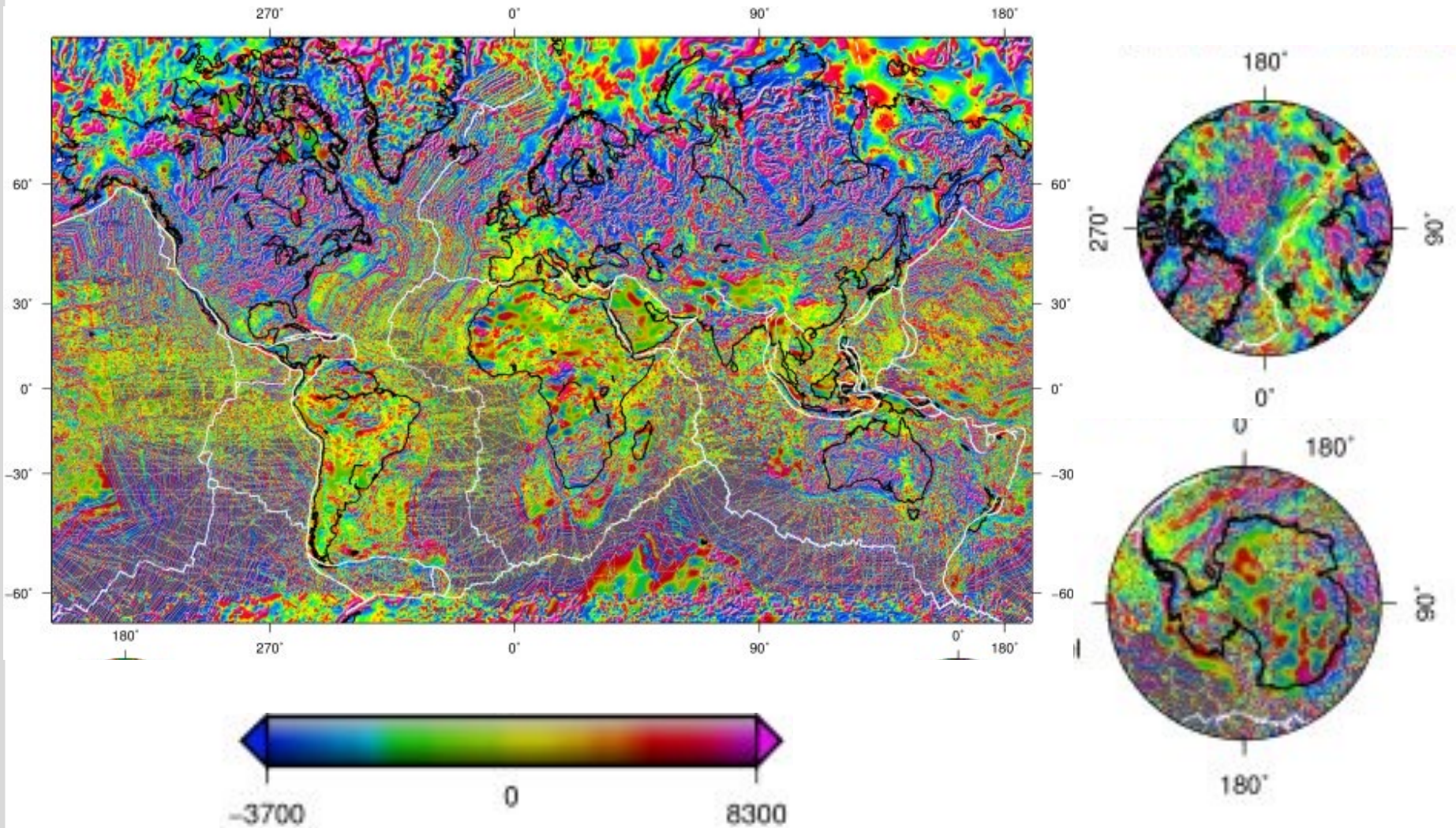


Olsen und Stolle, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2012, GFZ



Globale Magnetische Anomalien

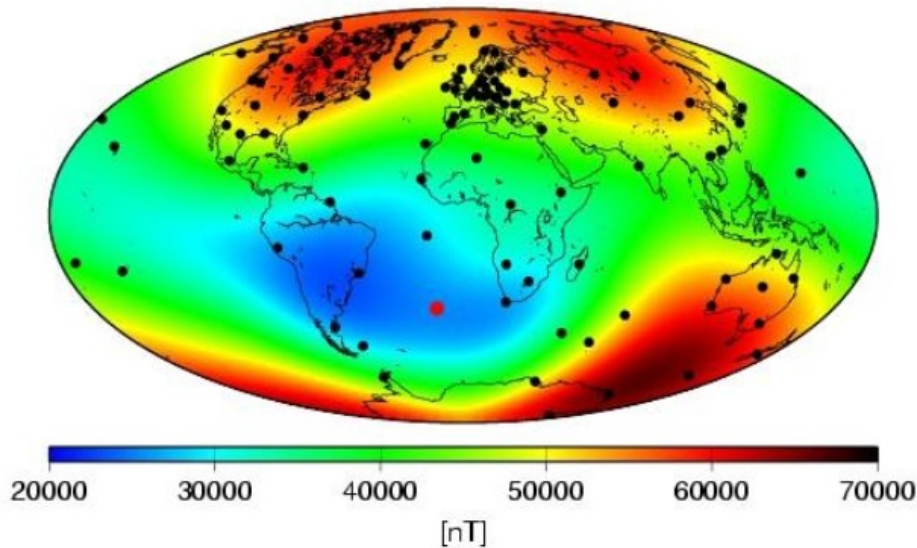
Restfeld nach Abzug des Dipolfelds



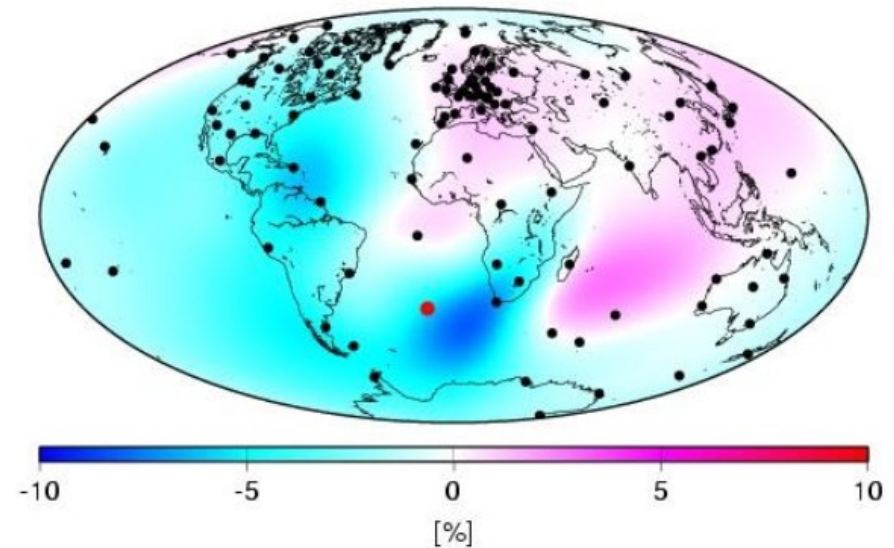
Erdmagnetfeld

Magnetische Feldstärke (Betrag) an der Erdoberfläche –
Variation der letzten 20 Jahre

Feldstärke in nT



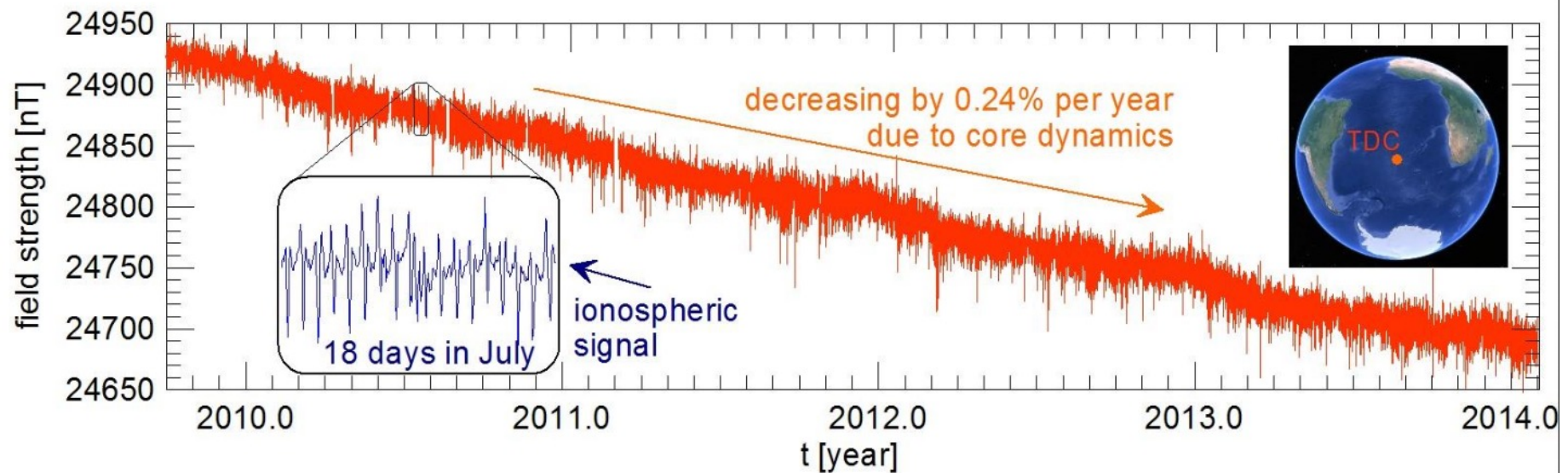
Variation der letzten 20 Jahre in %



GFZ, 2008

Erdmagnetfeld

Schnelle Abnahme der südatlantischen Anomalie

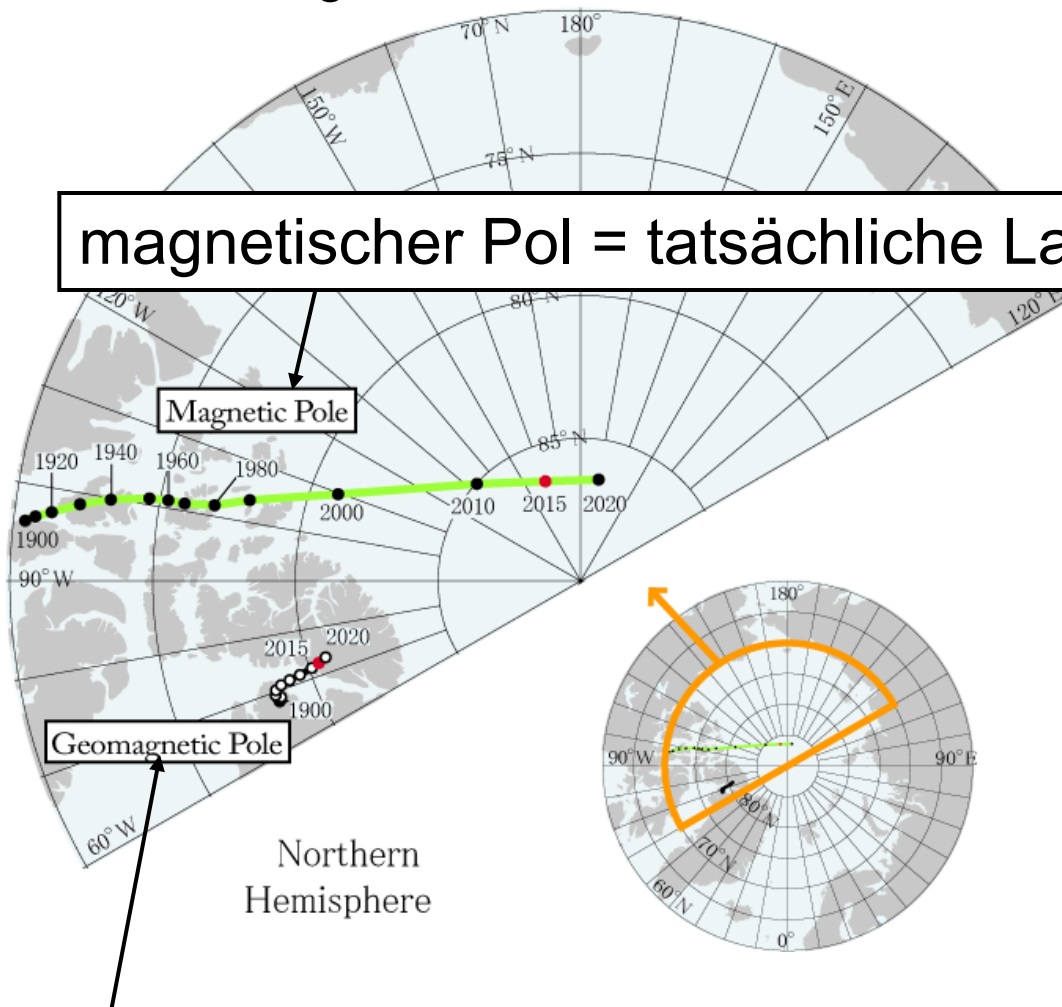


Stolle, 2014

Erdmagnetfeld

Polwanderung

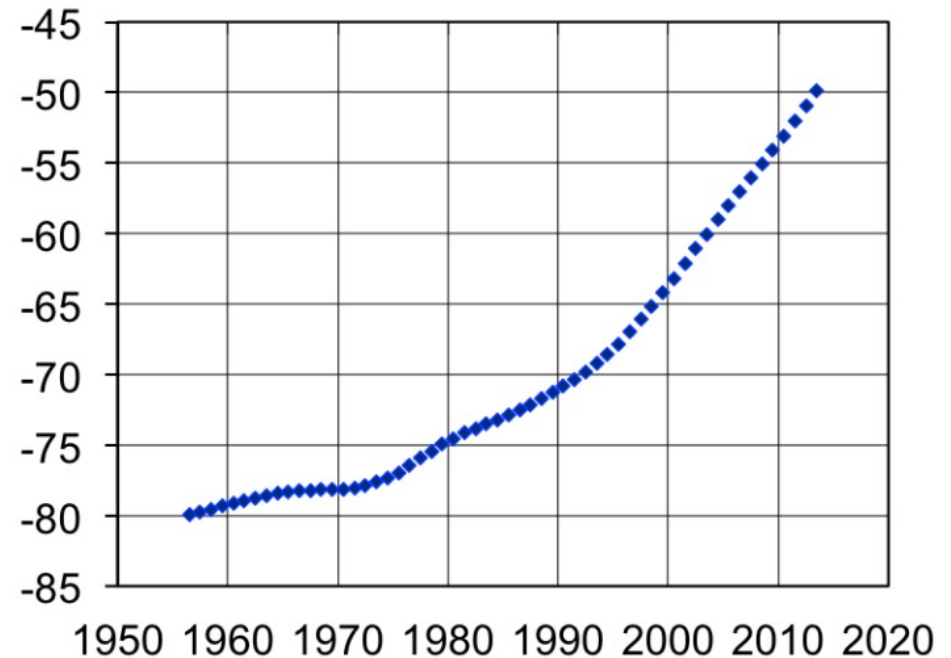
magnetischer Pol = tatsächliche Lage des Pols



geomagnetischer Pol = theoretischer Pol des
Erdmagnetfelds aus mittlerem Verlauf der Feldlinien

Erdmagnetfeld

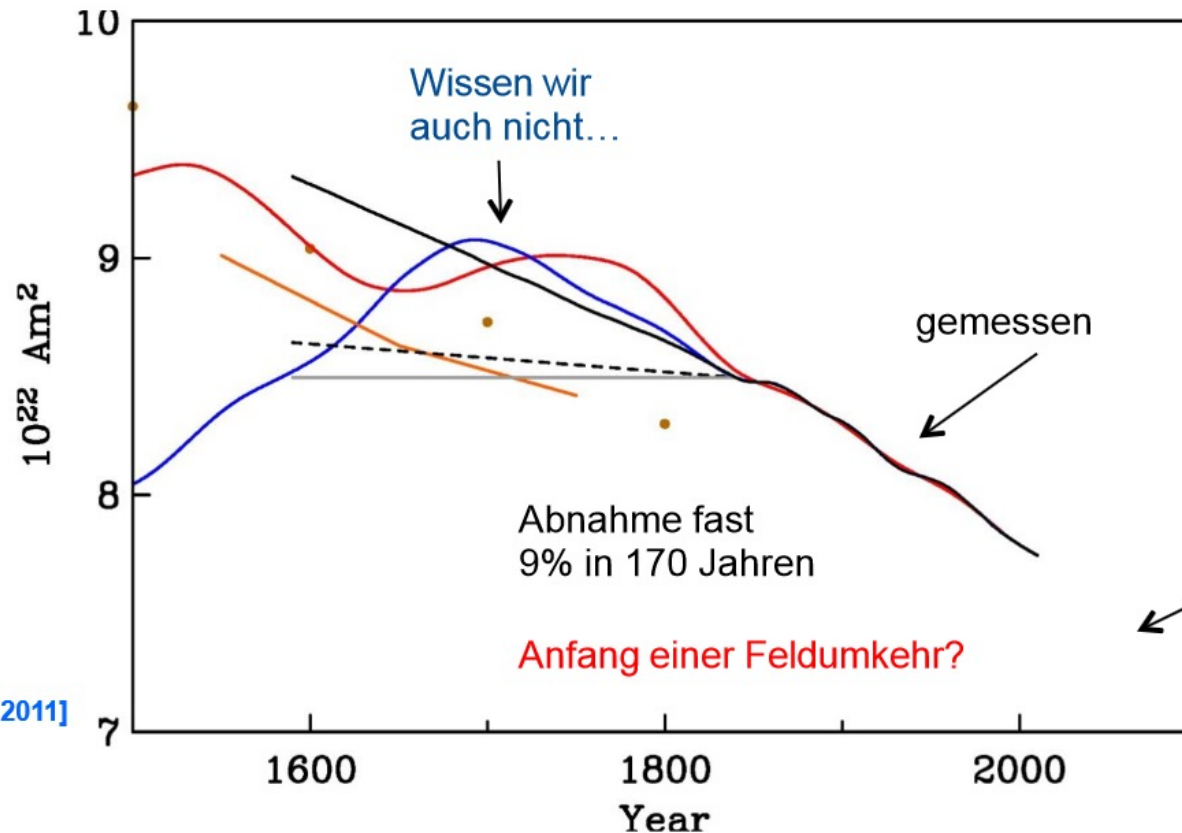
Schnelle Variation der Deklination in Polargebieten



Stolle, 2014

Erdmagnetfeld

Entwicklung des Dipolfelds in letzten Jahrhunderten

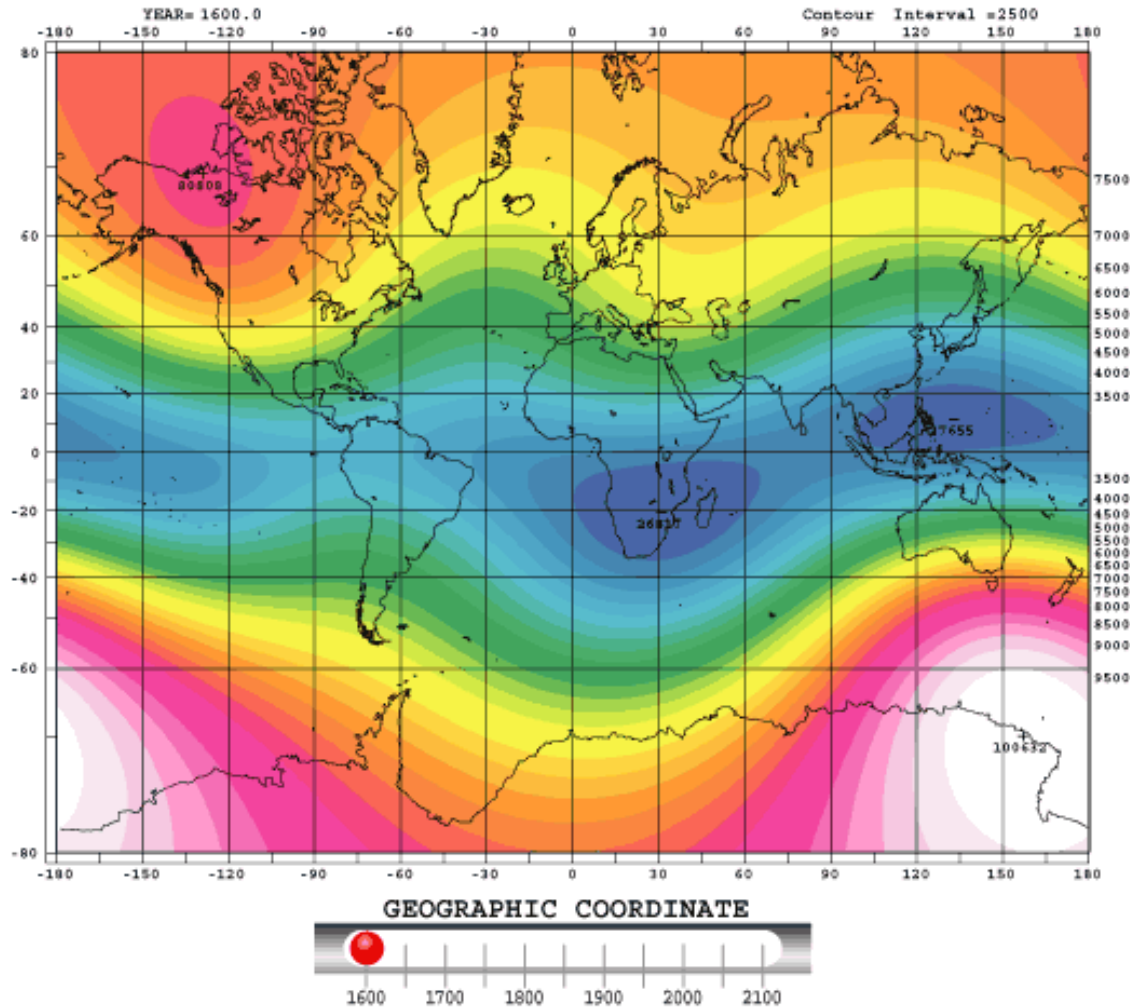


[Jackson et al., 2000]
[Gubbins et al., 2006]
[Finlay, 2008]
[Knudsen et al., 2008]
[Genevey et al., 2008]
[Korte et al., 2009]
[Korte and Constable, 2011]

Stolle, 2014

Erdmagnetfeld

Entwicklung des Dipolfelds in letzten Jahrhunderten



1. Abnahme der magnetischen Feldstärke
2. Ausbildung von Anomalien
3. Starke Polwanderung

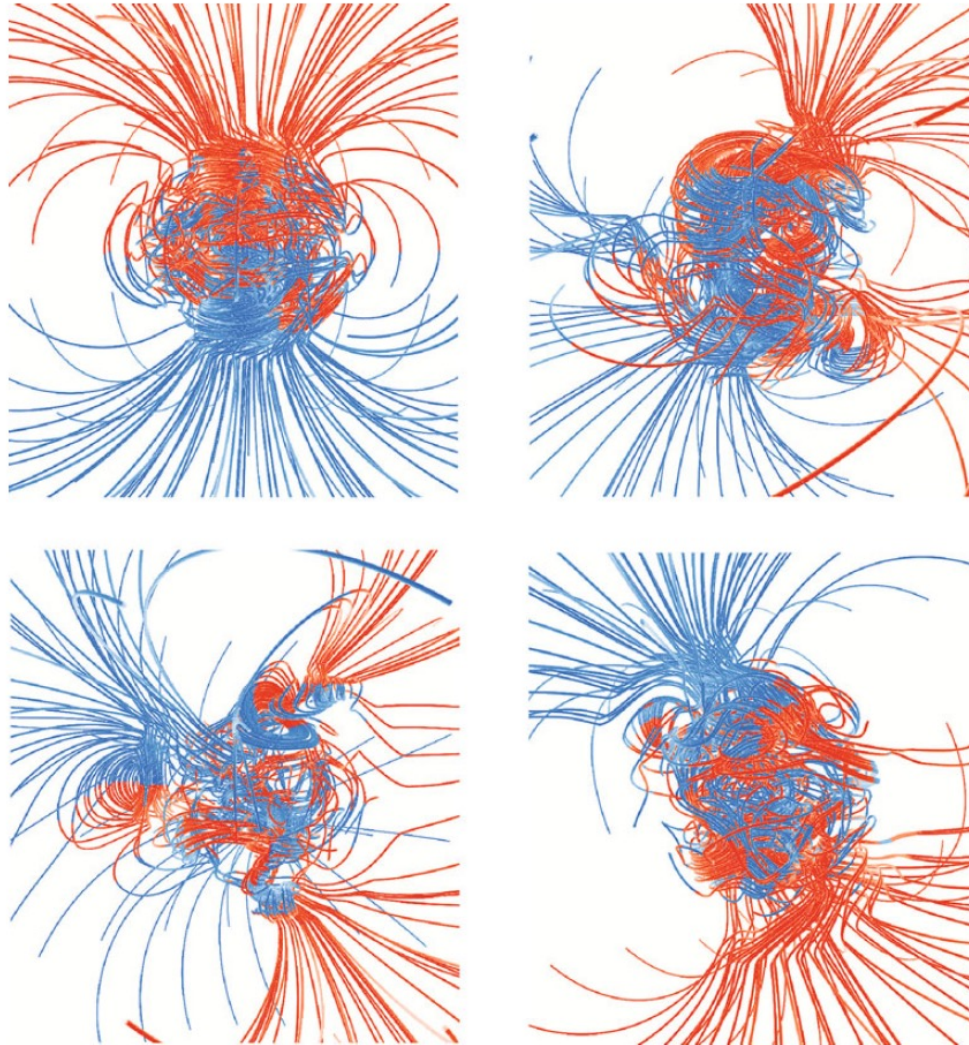
... deuten auf mögliche Umkehr oder Exkursion des Erdmagnetfelds hin

Quelle: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/anime/index.html>

Erdmagnetfeld

Mögliches Umkehrszenario

Abb. 5.12 Erdmagnetfeld aus dreidimensionalen magnetohydrodynamischen Modellrechnungen von G. A. Glatzmaier (University of California Santa Cruz) und P. H. Roberts (University of California Los Angeles) (Mit Genehmigung durch © Macmillan Publishers Ltd aus Glatzmaier & Roberts 1995a; Glatzmaier & Roberts 1995b, 1997; Glatzmaier 2007; Glatzmaier *undatiert*). Rote Feldlinien sind nach innen gerichtet, blaue nach außen. Die Rotationsachse der Modellerde ist vertikal und verläuft durch das Zentrum. *Oben (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



Erdmagnetfeld

Entwicklung des Dipolfelds in letzten Jahrhunderten

https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

Home

Background
Brief description of geomagnetism and observation systems

About WMM
Learn more about model derivation, uncertainties and magnetic poles

Model & Software
Download model coefficients, software and documentation

Online Calculators
Calculate magnetic field values at or near the Earth surface

Maps
Browse imagery and contour maps for main field and secular change

Uses of WMM
Common applications of WMM

License
License and copyright information

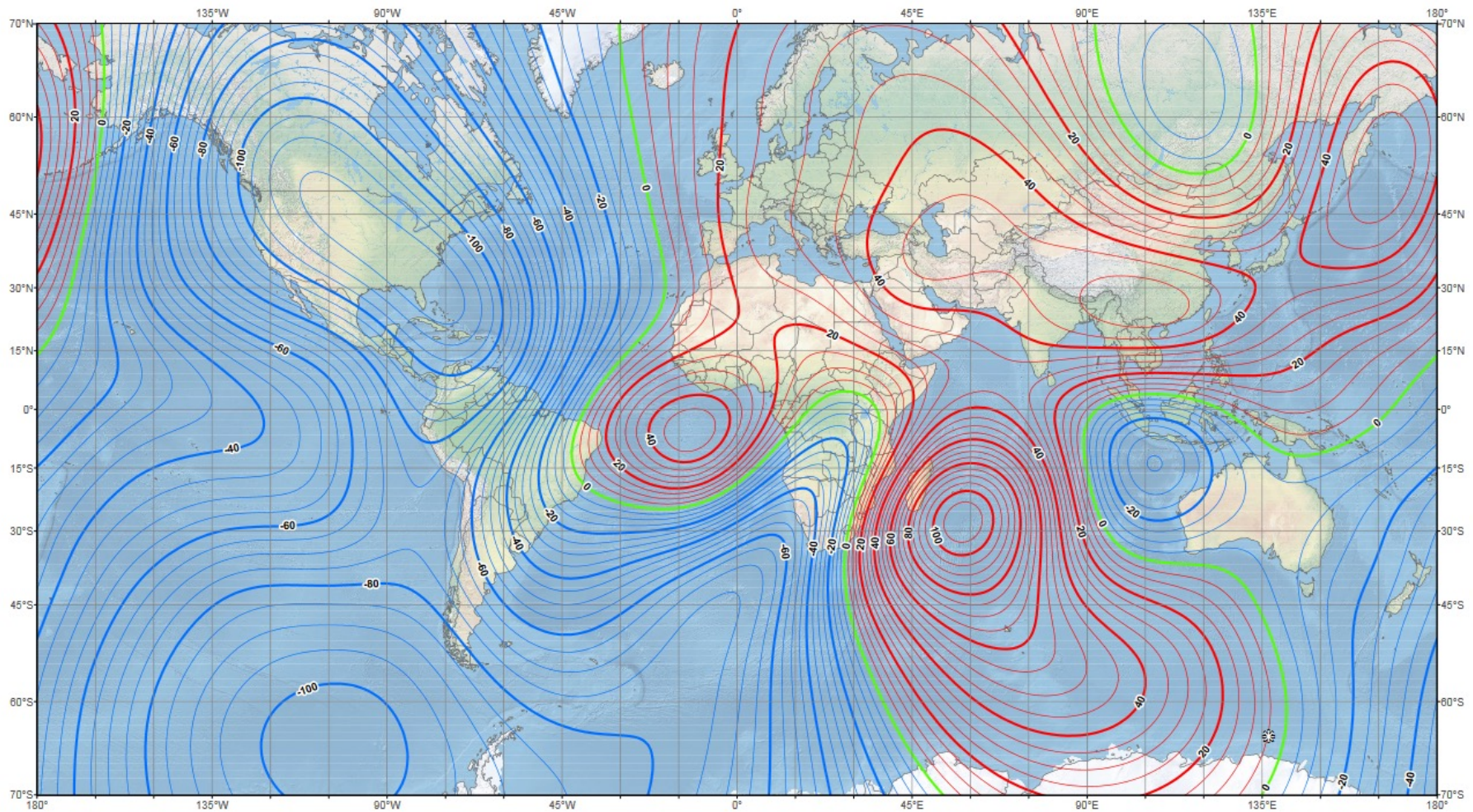
Maps of Magnetic Elements from the W

Contour maps were created for each of the seven magnetic elements (D, I, H, X, Y, Z, and F) and fo available for download in pdf format by clicking on the browse images below or you can download : print the maps using the Adobe® Reader® (available for free from the [Adobe website](#).) NOAA Discl. download in the ESRI [Shapefile format](#) . A detailed description of the file format is given in the [Esri](#)

Mercator Projection	Main Field	Secular Variation
D		
F		
H		
I		

elle: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/anime/index.html>

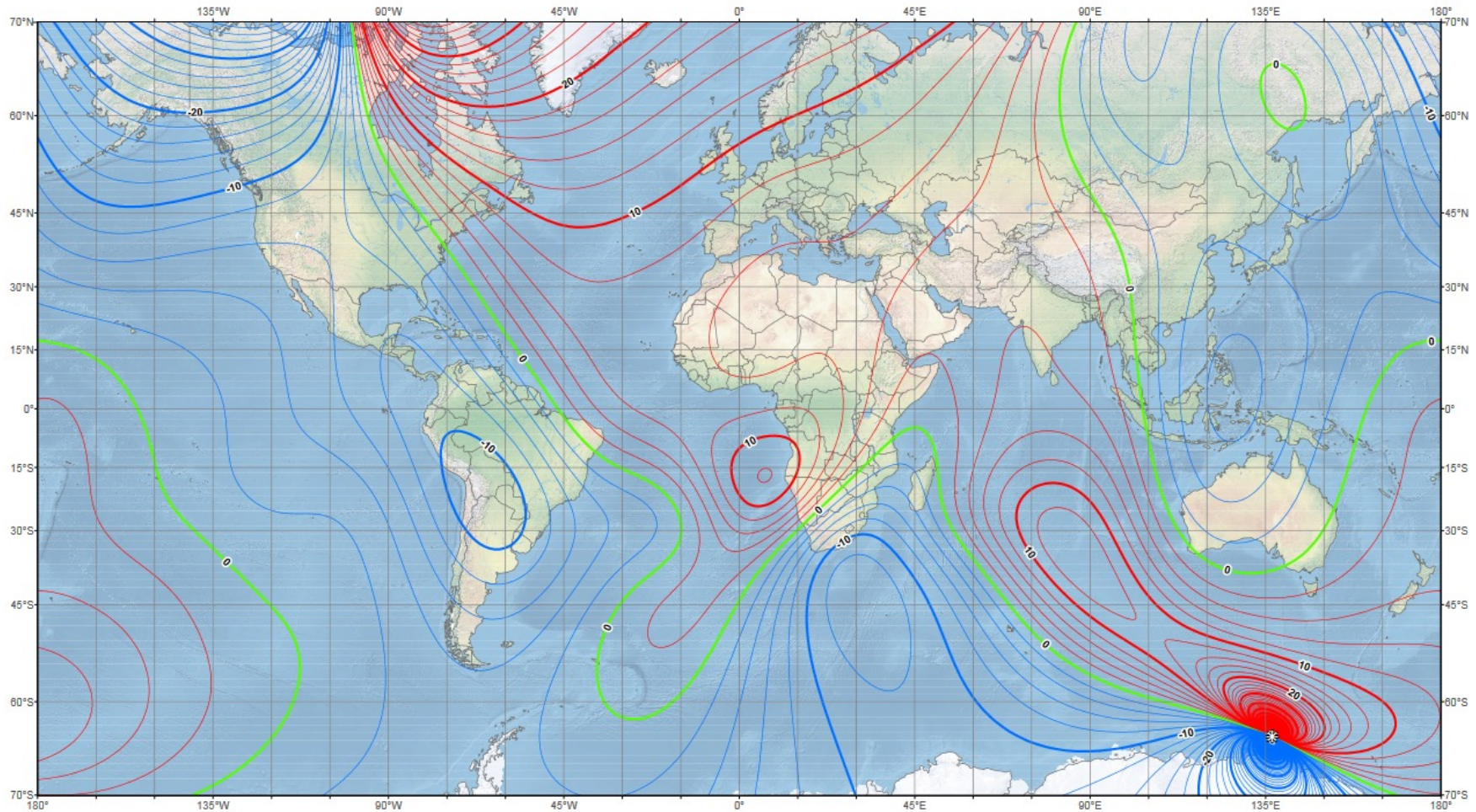
Annual Change Total Intensity (F)



Annual change total intensity (F)
Contour interval: 5 nT / year, red contours positive change; blue negative change; green zero change.
Mercator Projection.
Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRC
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WWW>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

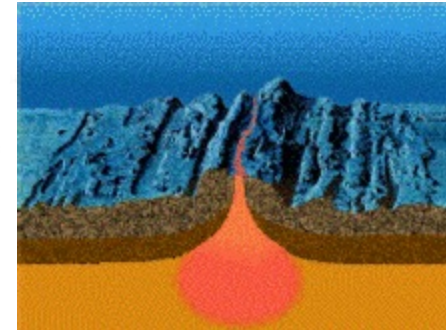
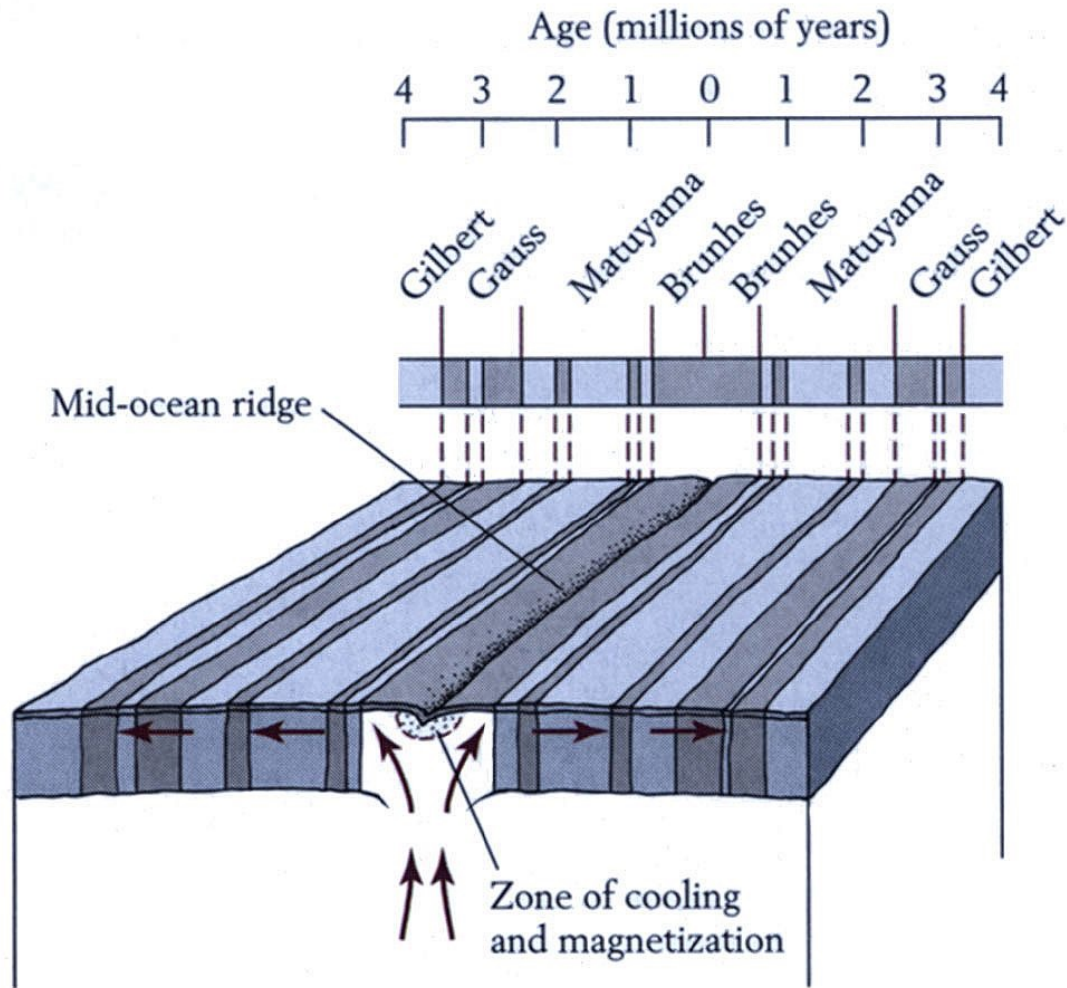
Annual Change Declination (D)



Annual change declination (D)
Contour interval: 2 arc-minutes / year, red contours positive (clockwise) change; blue negative (counter-clockwise) change; green zero change.
Mercator Projection.
☉: Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Umkehr des Erdmagnetfelds



Erdmagnetfeld

Umkehr der Polarität des Erdmagnetfelds in der Vergangenheit

Heute

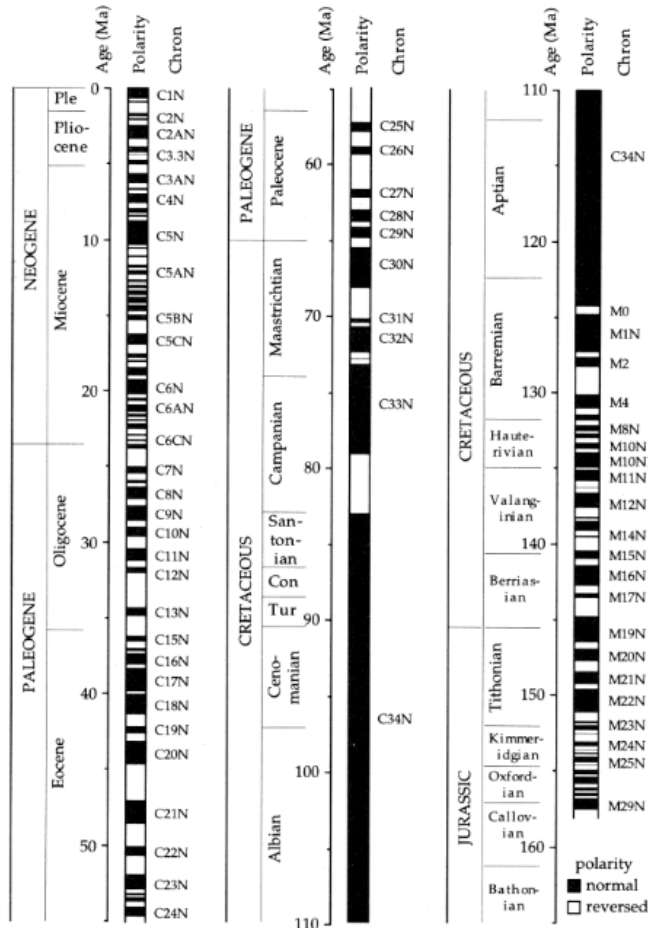


Fig. 5.78 The geomagnetic polarity timescale since the late Jurassic (based upon Harland *et al.*, 1990). Designations for normal polarity chrons are listed.

Schwarz: heutige (normale)
Polarität
Weiß: umgekehrte (inverse)
Polarität

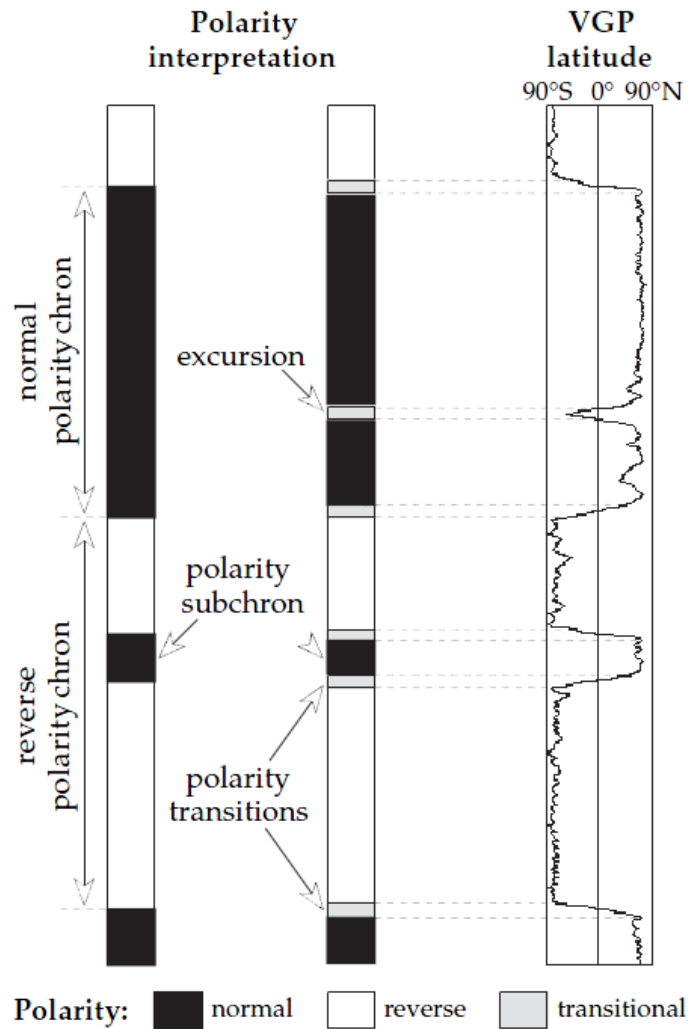
Umkehr durchschnittlich alle 500 ka,
letzte Umkehr vor 780 ka

Polsprung: innerhalb von $\sim 10^3$ a

Polexkursion: kurzzeitige ($10^2 - 10^3$ a)
Abschwächung, Rückkehr zur
ursprünglichen Polarität, trat in letzten
780 ka sieben Mal auf

Vor 160 Millionen Jahren

Umkehr des Erdmagnetfelds



Umkehr des Erdmagnetfelds

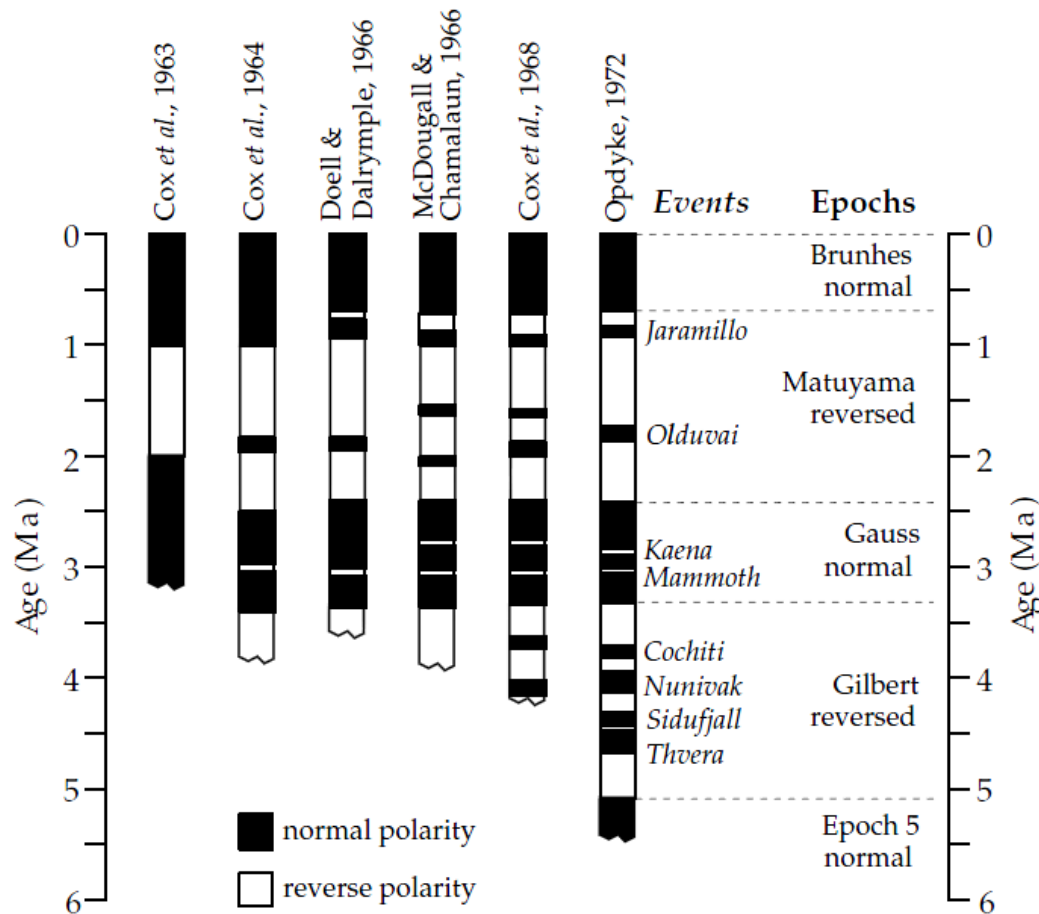


Fig. 5.73 Progressive evolution and refinement of the magnetic polarity timescale.

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a $10^2 - 10^3$ a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4		Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^2 a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4	$10^2 - 10^3$ a	Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4	$10^2 - 10^3$ a	Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a $10^2 - 10^3$ a	10% des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4		
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nähe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a $10^2 - 10^3$ a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4		Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a $10^2 - 10^3$ a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4		Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

Tab. 5.8 Die Quellen des Erdmagnetfelds (Schnucker 1985)

Bezeichnung				Ursache	Entstehungsort	Verteilung an der Erdoberfläche	Größe (nT) des zeitlich konstanten Anteils	Perioden der Variationen	Anteil der Variationen am Magnetfeld
Primärer innerer Anteil	Normalfeld	Hauptfeld	Dipolfeld	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von der geomagnetischen Breite	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	Säkularvariationen; einige 10^3 a $10^2 - 10^3$ a	10 % des Hauptfelds in den letzten 100 a; 100 % in geologischen Zeiten
			Nicht-Dipol-Anteil, planetarische Anomalien	Elektrische Stromwirbel	Äußerer Erdkern	Abhängig von λ, ϕ ; kein Zusammenhang Land-See	2×10^4		Bis 10 % des Dipolfelds in den letzten 50 Jahren
		Krustenfeld	Regionaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Bis Tiefe der Curie-Temperatur: 25 km–30 km	Abhängig von Krustenstruktur	Einige 100	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
Primärer äußerer Anteil			Lokaler Anteil	Gesteinsmagnetismus; induzierte und remanente Anteile	Nahe der Erdoberfläche	Abhängig von der Struktur der oberen Kruste	2×10^4	In geologischen Zeiträumen	100 % des Krustenfelds
				Stromwirbel in der hohen Atmosphäre, Ionisierung durch Strahlung der Sonne	Ionosphäre, E-Schicht in 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, λ, ϕ , Ortszeit, Jahreszeit	?	Mittlerer Sonnentag	10 nT–100 nT
				Durch Gezeiten (Mond, Sonne) erzeugte ionosphärische Winde	ca. 100 km Höhe	Lineare Dimension eines Erdquadranten, Ortszeit, Jahreszeit	?	Solare und lunare Ortszeit	1 nT–10 nT
				Stromwirbel, Partikelstrahlung der Sonne	Ionosphäre (E- und F-Schicht) 300 km	λ, ϕ , Polarlichtzonen	?	Periode der Sonnenaktivität 27 d	10 nT–1000 nT in mittleren Breiten; 5000 nT in Polarlichtzonen
				Ringströme um die Erde	Einige Erdradien Höhe	Homogen	?	d	Bis 100 nT
Sekundärer induzierter innerer Anteil				Induktion in leitenden Schichten des Erdinnern	Bis 600 km Tiefe	Regional verschieden	?	d; min; s.	Bis ca. 100 nT

Ursprung des Erdmagnetfelds

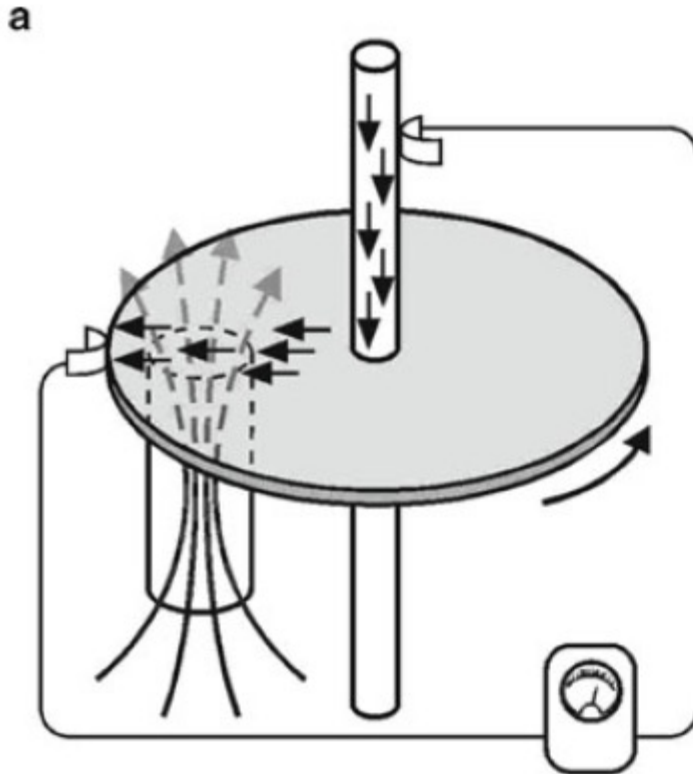


Abb. 5.8 a Prinzip des selbst-
erregten Geodynamos (nach ©
Elsasser 1958): Ein Dynamo
erzeugt Strom, wenn sich die
Kupferscheibe im Feld des Stab-
magneten bewegt (*links*)

Ursprung des Erdmagnetfelds

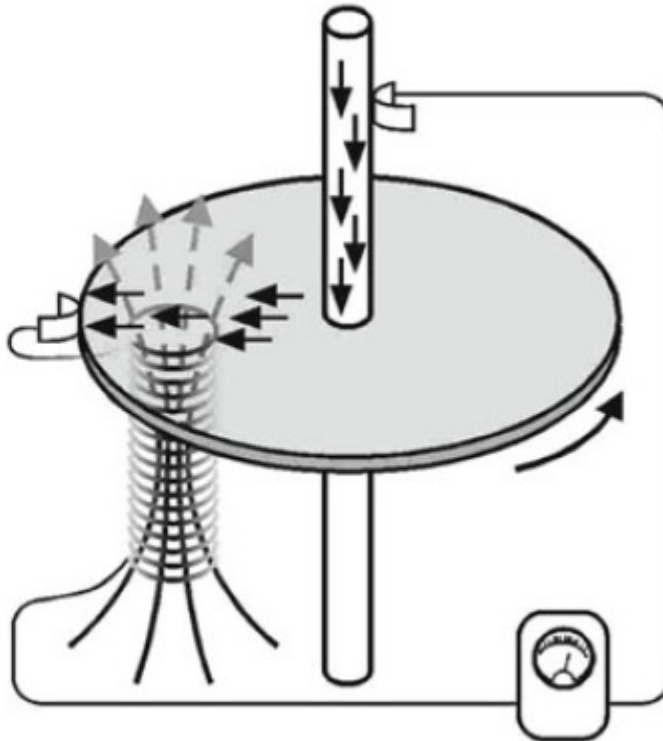
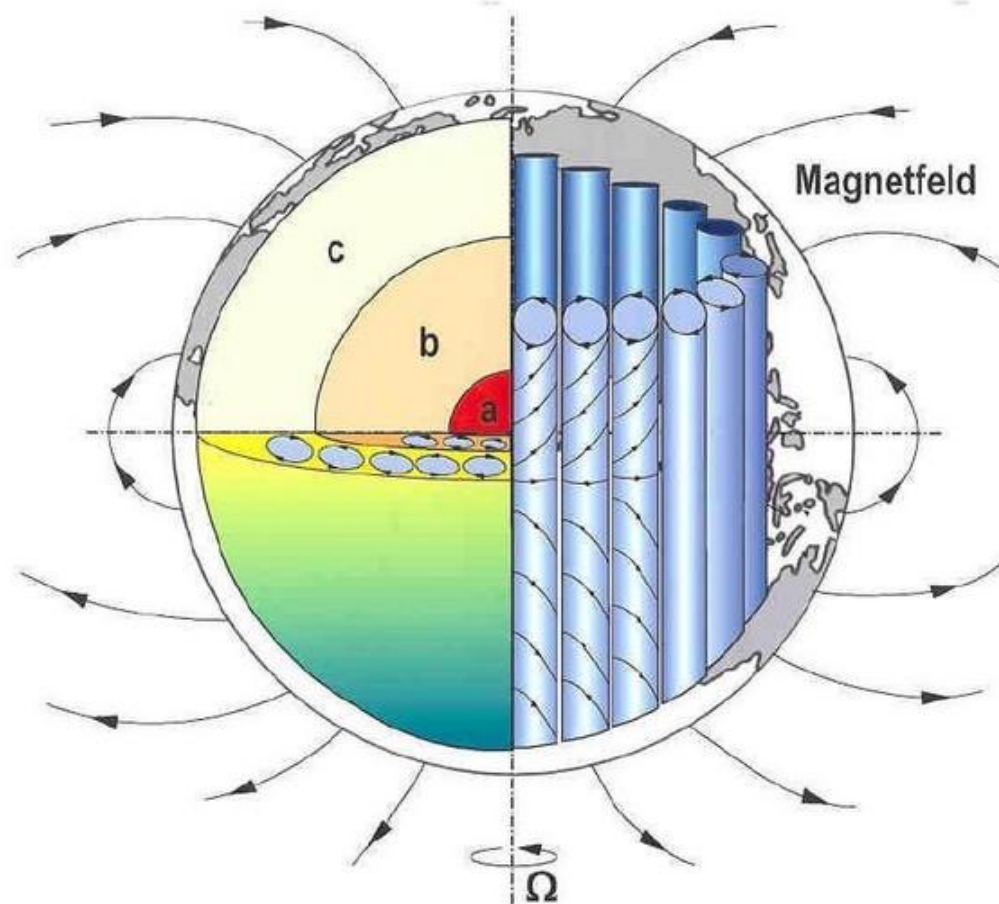


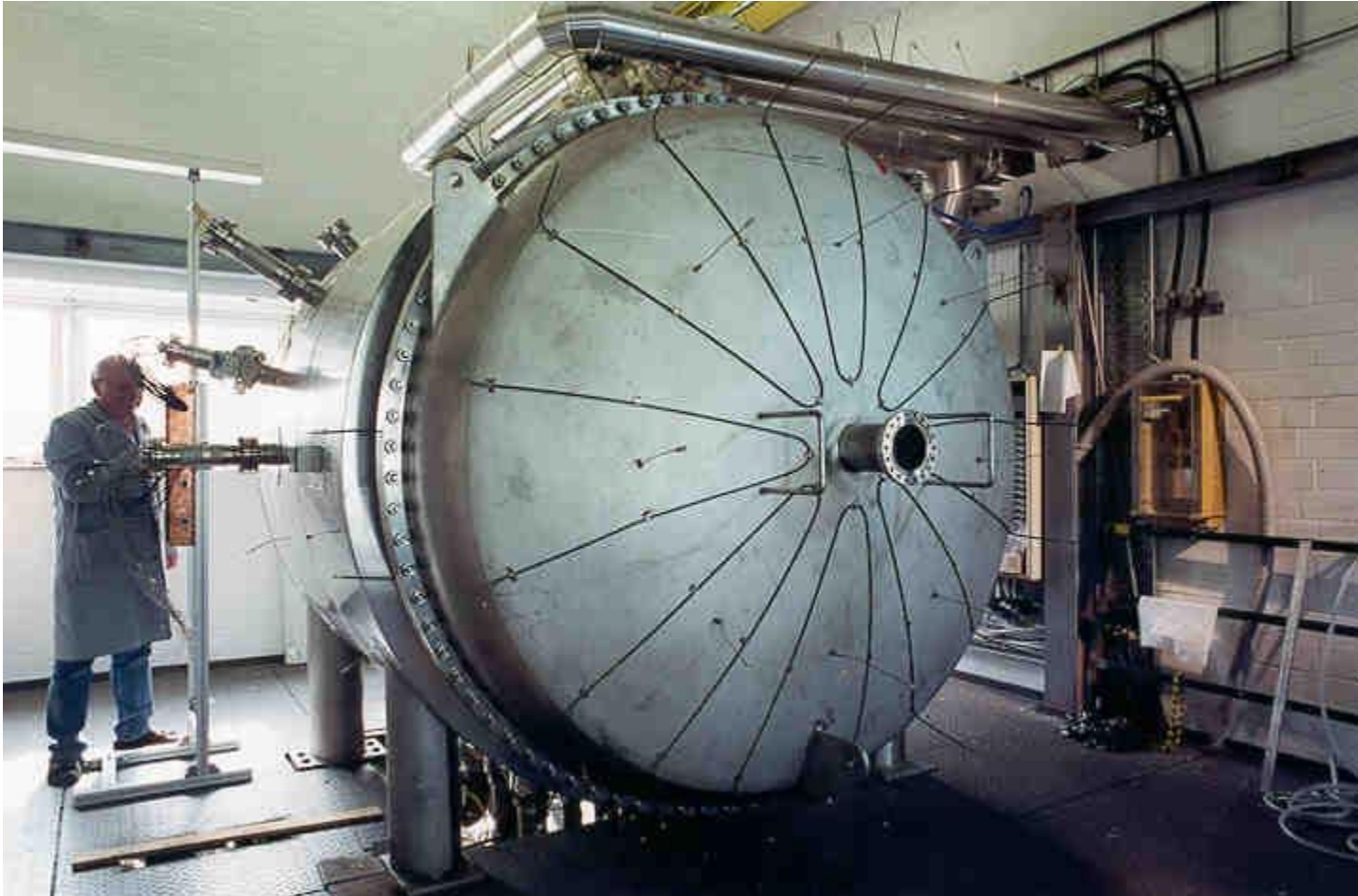
Abb. 5.8 a Prinzip des selbst-erregten Geodynamos (nach © Elsasser 1958): Ein Dynamo erzeugt Strom, wenn sich die Kupferscheibe im Feld des Stabmagneten bewegt (*links*). Wird dieser durch eine Magnetspule ersetzt und der erzeugte Strom in die Spule eingespeist, so bleibt das selbsterregte Magnetfeld erhalten, solange sich die Scheibe dreht

Ursprung des Erdmagnetfelds





In der linken Bildhälfte ist der innere Aufbau der Erde vereinfacht dargestellt. Über dem festen Kern (a) liegt ein flüssiger Kern (b), darüber der zähflüssige Erdmantel (c), der bis zur festen Erdkruste reicht. Sowohl im flüssigen Erdkern als auch im Erdmantel können sich aufgrund von Temperaturunterschieden walzenförmige Bewegungen ausbilden, die sich durch die zusätzlich wirkende Corioliskraft aufgrund der Drehbewegung der Erde (Ω) zu der im rechten Bildteil dargestellten schraubenförmigen Bewegung ausprägen. Diese schraubenförmige Bewegung wird im Dynamomodul, dem zentralen Baustein des Karlsruher Experiments, simuliert. Das Experiment hat gezeigt, dass sich darin ein stabiles Magnetfeld ausbildet. So funktioniert der Geodynamo, der das Magnetfeld der Erde antreibt.





Dieses Experiment im Forschungszentrum Karlsruhe dient zum Nachweis des Dynamo-effekts im Labor: Flüssiges Natrium durchströmt die insgesamt 52 Rohre innerhalb des großen Zylinders und erzeugt so ein selbsterregtes Magnetfeld.

Ursprung des Erdmagnetfelds

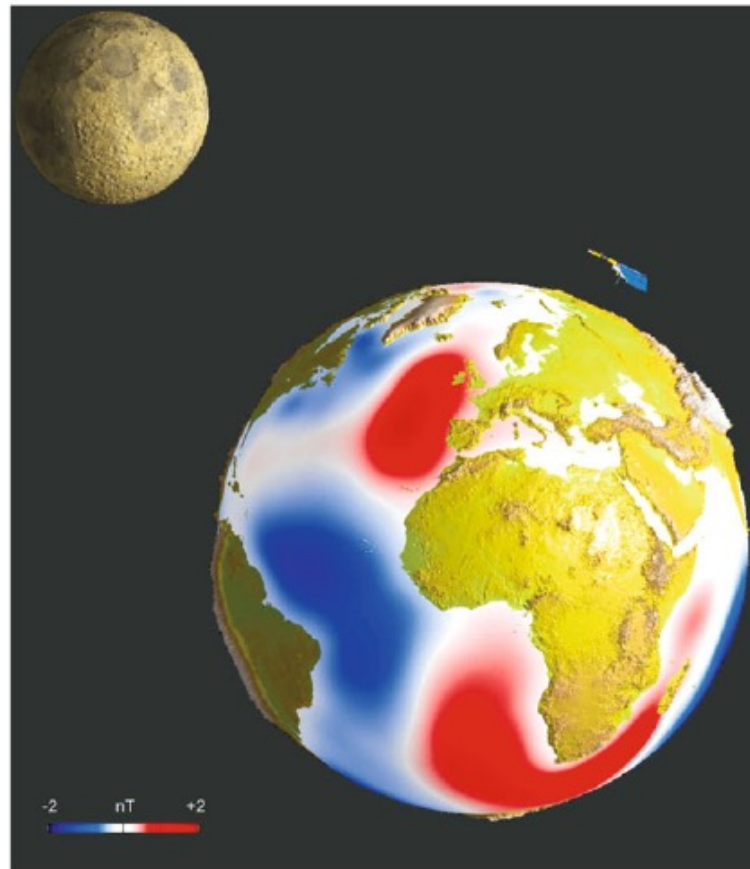


Abb. 5.18 Unten: Magnetische Signatur mariner Gezeitenströmungen in den Daten des Satelliten *CHAMP*; Oben: a Realteil der vom Modell TPXO.5.2c für die halbtägige lunare Haupttide M2 (Periode: 12,42 h) vorhergesagten Variation der Meeresspiegelhöhe; b Realteil der für die Haupttide M2 vorhergesagten Anomalie der magnetischen Feldstärke. Ein Vergleich mit Messdaten bedarf allerdings einer die-

sen Messdaten entsprechenden vorherigen Filterung; c Vergleich des vorhergesagten (links) mit dem beobachteten (rechts) Realteil des harmonischen Beitrags von M2 zu den Residuen der Magnetfeldstärke; d Das Leistungsspektrum der magnetischen Feldstärkeresiduen weist im Ozean eine klare Spitze für M2 auf im Gegensatz zum Kontinent (nach © Tyler et al. 2003, © Maus & Manoj 2007)



Zusammenfassung – Take-home-message

- Wie kann das Erdmagnetfeld mathematisch beschrieben werden?
- Welche zeitlichen und räumlichen Änderungen treten auf?
- Wo liegt sein Ursprung?