

# Ein Diskussionsbeitrag zur Ursache des Erdmagnetfelds –

angeregt durch die Art des Feldlinien-Verlaufs

*hans wm KÖRBER*

„Wenn ich weiter sah, so weil ich auf den Schultern von Giganten stand“

*Newton an Hooke, 1676*

**Nun ist es bereits 1000 Jahre her, seit der Kompaß erfunden wurde. Zu vielen Fragen, die damals noch gar nicht gestellt werden konnten, gibt es heute plausible Antworten. Vom Magnetismus allgemein haben wir inzwischen ziemlich klare Vorstellungen. Aber die Ursache des Erdmagnetismus ist noch immer unklar oder wird kontrovers diskutiert. Was dabei bisher gänzlich unberücksichtigt blieb, ist der zu vermutende Zusammenhang zwischen Erdrotation und dadurch bewegten Ladungsträgern. Dem wird hier nachgegangen.**

## 1. Einleitung

In der griechischen Antike war die magische Anziehungskraft einiger seltener Gesteine auf Eisen bekannt. Man wußte, daß diese Eigenschaft eines Magneteisensteins, strich man mit ihm über ein Eisenstück, auf dieses übertragbar ist. Chinesen entdeckten vor 1000 Jahren, daß sich eine frei bewegliche Magnetnadel in Nord-Südrichtung ausrichtet und erfanden damit den Kompaß. Seefahrer wie bereits **Columbus** nutzten dies zum Navigieren mit der Angstvorstellung, im Norden befände sich ein riesiger Magnetberg, an dem ihr Schiff zerschellen könnte.

**William Gilbert** enträtselte das Phänomen mit seiner Erklärung, daß die Erde als Ganzes ein Magnet sei. Spätestens seit dem wird nach der Ursache des Erdmagnetismus gesucht. Während **Gilbert** glaubte, die Erde rotiere, weil sie magnetisch sei, sah **Patrick Maynard Stuart Blackett** (Nobelpreisträger von 1948) den gegensätzlichen Zusammenhang: Die Erde ist magnetisch, weil sie rotiert. **Blackett** schlug sogar vor, daß möglicherweise ein neues universelles Phänomen existieren könnte, daß nämlich jedes rotierende Objekt einen ihm innewohnenden Magnetismus besitzt. Diese Ansicht ist zunächst nicht absurd. Glaubt man doch auch von Elektronen und Protonen, daß sie ein magnetisches Moment wegen ihres „Spins“ besäßen. In gewöhnlichen Materialien zeigen die Spinachsen der atomaren Magnete in alle möglichen Richtungen, so daß sich ihre Wirkungen auslöschen. Doch in bezug auf die Erde war die Vermutung **Blacketts** falsch. Experimente mit rotierenden Objekten, die nach seiner Theorie eine meßbare Magnetisierung besitzen sollten, hatten keine. Auch zeigten spätere Beobachtungen, daß sich während der letzten zig Millionen Jahre die magnetische Polarität der Erde viele Male umgekehrt hatte - etwas das **Blacketts** Theorie niemals erlauben würde.<sup>[1]</sup>

Zum Erdmagnetismus werden inzwischen einige andere Ursachen in Erwägung gezogen. So bspw, daß der eisenhaltige ionisierte flüssige äußere Erdkern durch Konvektion bewegt wird. Ferner verwirbeln Konvektionsströme im Erdinneren wegen der Erdrotation und der dadurch auftretenden Corioliskraft, was die Flußdichte erhöht (**Geodynamo**). Auch die Gezeitenkräfte könnten ein Anlaß sein, weil sie den Erdmantel gegenüber dem flüssigen Erdkern abbremsen – der dadurch schneller rotierende Kern induziert einen elektrischen Strom (**Superrotation**).

Wenn zum Verständnis des Erdmagnetfelds auch Fortschritte durch Modellierung und mit Rechner-Simulation erzielt wurden, ist ein Großteil der komplexen Vorgänge des irdischen Magnetismus noch immer ungeklärt. Alle bisherigen Beobachtungen und Messungen sowie Theorien, auf die hier nicht intensiver eingegangen wird, mögen ihren Teil zur Anschaulichkeit beitragen. Hier wird ein Aspekt zur Diskussion gestellt, der m W bisher unberücksichtigt blieb.

## 2. Dicht daneben ist auch vorbei (gedacht)

Nun ist bekannt, daß zumindest das Elektron ein magnetisches Moment durch seinen vermeintlichen „Spin“ nur relativistisch gesehen besitzt. Klassisch und nachvollziehbar existiert das magnetische Moment wegen seines intrinsischen Kreisumlaufs.<sup>[2]</sup> Ein in sich rotierendes Teil mit Ladungsfilm erzeugt gemäß Elektron-Modell<sup>[3]</sup> kein Magnetfeld. Die irrije Meinung einer filmmäßig von elektrischer Ladung überzogenen (Erd-)Kugel ließ auch **Blacketts** Idee scheitern.

Aber, zur Erde gelangen trotz der schirmenden Magnetosphäre bspw durch den „Sonnenwind“ ständig einige Partikel, vor allem freie Ladungsträger, die sich auf Magnetosphäre bis hinab zur Troposphäre, Erdoberfläche und -inneres verteilen. Beim Anblick des Feldlinienverlaufs des Erdmagnetfelds liegt daher über dessen Entstehung folgende Vermutung nahe: Angenommen, die Erdkugel ist überschüssig mit Elektronen geladen. Dann schwankt die Energiedichte ihrer Elektronenfelder in allen Raumpunkten wegen der Erddrehung entsprechend. Dadurch erzeugt jedes Elektron ein kleines Magnetfeld. Alle Teilfelder sind dabei gleichgerichtet, und ihre Addition ergibt nach dem Superpositionsprinzip das (jetzige) Erdmagnetfeld. Besteht zu anderer Zeit auf der Erdkugel unter den freien Ladungsträgern ein Elektronenmangel, ist ein umgepoltes Erdmagnetfeld vorhanden. Die heterogene, unruhige und asymmetrische Erdinnenstruktur läßt bekanntlich kein statisches symmetrisches Erdfeld zu. Externe Einflüsse (besonders Sonnenwind) kommen hinzu. Stichwörter: Sich lokal ändernde Deklination, Inklination, Flußdichte, wandernde Magnetpole, derzeit um 11,5 ° geneigte Dipolfeldachse gegenüber Erdachse. Geomagnetische Anomalien (**Kursk, Münchberger Gneismasse**) sowie Schwankungen sind folglich nicht kurios, und während der **Umpolung** gibt es selbst auf der Erdoberfläche **Multipole**.

Vermutlich ist das Feld, das durch mit der Erddrehung umlaufende Elektronen erzeugt wird, eine von mehreren Komponenten. Unter vereinfachender Annahme, diese Komponente sei die wesentliche (oder gar einzige), läßt sich mit bekannten aktuellen Feldgrößen einiges rechnen<sup>[4] [5]</sup>.

### 3. Magnetfeldberechnungen mit bekannten Feldgrößen

Da die Feldwerte ständigen Schwankungen unterliegen sowie die hier angenommene Ursache wohl kaum die einzige für das Magnetfeld ist, reichen zur Abschätzung der Verhältnisse Überschlagsrechnungen.

Das Erdmagnetfeld kann seiner Form nach von einem Kreisstrom erzeugt sein und hat dadurch ein magnetisches Moment  $\mu_E = [7,746 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2]$ . Ein solches läßt sich als Produkt eines Kreisstroms und einer Fläche, die dieser umläuft, darstellen. Die Fläche ist in diesem Fall die vom Äquator umschlossene  $A_{\bar{A}} = \pi r_{\bar{A}}^2$ . Der auf den Äquator bezogene **Kreisstrom**  $I_{\bar{A}}$  beträgt mit Äquatorradius  $r_{\bar{A}} = 6.378.160 \text{ m}$  somit (und dies entspricht der Durchflutung  $\Theta_E$ ):

$$I_{\bar{A}} = \frac{\mu_E}{A_{\bar{A}}} = \frac{\mu_E}{\pi r_{\bar{A}}^2} \triangleq \Theta_E \approx 6,0608956 \cdot 10^8 \text{ A} \quad (1)$$

Kreisstrom  $I_{\bar{A}}$  ergibt sich auch aus der Anzahl Ladungsträger  $n \cdot e_0$ , die mit Kreisfrequenz  $\omega_E$  der Erde bewegt werden. Ein siderischer Tag der Erde dauert etwas  $< 24 \text{ h}$ , die **Erd-Kreisfrequenz**  $\omega_E$  beträgt daher:

$$\omega_E = \frac{2\pi}{23^{\text{h}} \cdot 3.600^{\text{''}} / \text{h} + 56^{\text{''}} \cdot 60^{\text{''}} / ^{\text{''}} + 4,1^{\text{''}}} \approx 7,2921151 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

Es muß damit, auf den Äquator bezogen, eine elektrische **Ladungsmenge**  $q_{\bar{A}} = n \cdot e_0$  im Umlauf sein:

$$q_{\bar{A}} = n \cdot e_0 = \frac{2\pi I_{\bar{A}}}{\omega_E} = \frac{2\mu_E}{r_{\bar{A}}^2 \omega_E} \approx -5,2223 \cdot 10^{13} \text{ A} \cdot \text{s} \quad (3)$$

Das ergibt, wenn diese allein dem Äquator zugeordnet wird, eine elektrische **Linienladungsdichte**  $\lambda_{\bar{A}}$  von:

$$\lambda_{\bar{A}} = \frac{q_{\bar{A}}}{2\pi r_{\bar{A}}} = \frac{I_{\bar{A}}}{r_{\bar{A}} \omega_E} = \frac{\mu_E}{\pi r_{\bar{A}}^3 \omega_E} \approx -1,3031 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{s} / \text{m} \quad (4)$$

Die **Anzahl an Ladungsträgern**  $\#e_0$ , auf den Äquator gerechnet, macht:

$$\#e_0 = n_{\bar{A}} = q_{\bar{A}} / e_0 \approx 3,25951 \cdot 10^{32} \text{ Elektronen} \quad (5)$$

Diese verteilen sich sicherlich nicht gleichmäßig auf Erdkruste, Erdoberfläche und erdnahem Weltraum. Auf die hauptsächlich beteiligte Erdoberfläche  $A_{EO} = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$  mögen es davon 95 % sein ( $\triangleq 3,1 \cdot 10^{32}$  Elektronen). Unterstellt man gleiche Ladungsträgerabstände, entfallen auf die Erdoberfläche, also in **Bodennähe** damit:

$$\#e_0 / \text{m}^2 = \#e_0 / A_{EO} \quad \begin{array}{l} \text{(bei 95 \% in Bodennähe)} \\ \text{(bei 100 \% , insgesamt)} \end{array} \approx \begin{array}{l} 6,07 \cdot 10^{17} \text{ Elektronen} / \text{m}^2 \\ 6,39 \cdot 10^{17} \text{ Elektronen} / \text{m}^2 \end{array} \quad (6)$$

bzw **Flächenladungsdichte**  $\sigma_{EO}$ :

$$\sigma_{EO} = \frac{q_{\bar{A}}}{A_{EO}} = \frac{2\pi I_{\bar{A}}}{A_{EO} \omega_E} = \frac{2\mu_E}{A_{EO} r_{\bar{A}}^2 \omega_E} \quad \begin{array}{l} \text{(bei 95 \% in Bodennähe)} \\ \text{(bei 100 \% , insgesamt)} \end{array} \approx \begin{array}{l} -0,1024 \text{ A} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \\ -0,1078 \text{ A} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \end{array} \quad (7)$$

Und auch die Elektronenzahl nach (6) wird nicht wie ein Film bodennah verbleiben, sondern in einem Raum darüber verteilt sein. Bei einer (willkürlichen) Raumhöhe von 1.000 m (unterste Troposphäre) und homogener (!) Dichte sind es  $6 \cdot 10^{14} \text{ Elektronen} / \text{m}^3$  bzw (vereinfacht gerechnet) eine **Raumladungsdichte**  $\rho_{Trop}$ :

$$\rho_{Trop} \approx e_0 \cdot 6 \cdot 10^{14} \text{ Elektronen} / \text{m}^3 \approx \sigma_{EO} / 1 \text{ km} \quad \begin{array}{l} \text{(bei 95 \% in Bodennähe)} \\ \text{(bei 100 \% , insgesamt)} \end{array} \approx \begin{array}{l} -10^{-4} \text{ A} \cdot \text{s} / \text{m}^3 \\ -1,08 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{s} / \text{m}^3 \end{array} \quad (8)$$

Bedenkt man, daß sich in Bodennähe etwa  $2,7 \cdot 10^{25}$  Luftmoleküle /  $\text{m}^3$  befinden, ist die **Raumladungsdichte** doch recht gering, also möglich:

$$\frac{2,7 \cdot 10^{25} \text{ Luftmoleküle} / \text{m}^3}{6 \cdot 10^{14} \text{ Elektronen} / \text{m}^3} \approx \begin{array}{l} 4,5 \cdot 10^{10} \text{ Luftmoleküle auf ein freies Elektron} \\ 4,3 \cdot 10^{10} \text{ Luftmoleküle auf ein freies Elektron} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{(bei 95 \% in Bodennähe)} \\ \text{(bei 100 \% , insgesamt)} \end{array} \quad (9)$$

Mit der Dipolfeld-Formel kann die magnetische **Flußdichte**  $B(R; \lambda_m)$  in Abhängigkeit von Abstand  $R$  (hier bis zum Erdmittelpunkt) und magnetischer Breite  $\lambda_m$  näherungsweise berechnet werden<sup>[4]</sup>:

$$B(R;\lambda_m) \approx \frac{M}{R^3} \sqrt{1+3 \sin^2 \lambda_m} \quad (10)$$

In (10) ist  $M$  das Dipolmoment in  $[7,746 \cdot 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3]$  (Stand IGRF-1, 2010), das sich derzeit um  $[-0,006 \cdot 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3/\text{a}]$  ändert.

Für den Äquator errechnet sich eine Flußdichte von ca 30  $\mu\text{T}$ , für die Pole ein etwa doppelter Wert. Für **Mitteleuropa** ( $\lambda_m = 60^\circ$ ) werden ca 48  $\mu\text{T}$  gemessen, die sich aus ca 20  $\mu\text{T}$  horizontal und ca 44  $\mu\text{T}$  vertikal zusammensetzen.

Man geht davon aus, daß im **äußeren** Magnetfeld eine **Energie** von  $[\text{etwa } 10^{18} \text{ Joule}]$  gespeichert ist<sup>[6]</sup>. Rechnerisch ergibt sich Magnetfeldenergie  $W_{mE}$  bspw aus dem Produkt von magnetischem Fluß  $\Phi_E$  und magnetischer Durchflutung  $\Theta_E$ :

$$W_{mE} = \frac{1}{2} \Phi_E \cdot \Theta_E \quad \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ Joule} \quad (11)$$

Hierbei wird davon ausgegangen, daß durch Elektronen-Bewegung verursachte äußere und innere Magnetfeld-Energien gleich groß sind. Mit (1) ist  $\Theta_E$  bekannt. Der (äußere) magnetische **Fluß**  $\Phi_E$  kann folglich abgeschätzt werden zu:

$$\Phi_E = 2 W_{mE} / \Theta_E \quad \approx 6,6 \cdot 10^9 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (12)$$

und macht damit auf den Äquatorkreis gerechnet eine mittlere **innere** magnetische **Flußdichte**  $r^{\circ} B_{\lambda i}$  aus von:

$$r^{\circ} B_{\lambda i} = \Phi_E / A_{\lambda} \quad \approx 5,16 \cdot 10^{-5} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 51,6 \mu\text{T} \quad (13)$$

Dieser Wert liegt erwartungsgemäß über dem auf der Erdoberfläche am Äquator gemessenen **äußeren** von ca 30  $\mu\text{T}$ .

Die Summe der elektrischen Feldenergien  $W_{eE}$  der nach (5) berechneten Elektronen, die an der Erdmagnetfeld-Erzeugung beteiligt sind, ergibt sich als Vielfaches der Elektroföld-Energie  $[W_{e0} = 4,093\,552\,532\,7296 \cdot 10^{-14} \text{ J}]$ <sup>[7]</sup> zu:

$$W_{eE} = n_{\lambda} \cdot \frac{e_0^2}{8\pi r_e \epsilon_0} = n_{\lambda} \cdot W_{e0} = \frac{1}{2} n_{\lambda} \cdot W_0 \quad \approx 1,33795 \cdot 10^{19} \text{ J} \quad (14)$$

in (14) mit klassischem Elektronradius  $r_e = [2,817\,940\,3267(27) \cdot 10^{-15} \text{ m}]$ <sup>[7]</sup> und elektrischer Feldkonstante  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c_0^2) = [8,854\,187\,817 \dots \cdot 10^{-12} \text{ s} \cdot \text{A} / (\text{V} \cdot \text{m})]$ <sup>[7]</sup> sowie der Elektron-Ruheenergie  $W_0 = [8,187\,105\,06(36) \cdot 10^{-14} \text{ J}]$ <sup>[8]</sup>.

Je nach geografischer Breite  $\lambda_g$ , auf der die freien Elektronen durch Erddrehung mitgeführt werden, bewegen sich diese mit unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeit  $v_U = v_{\lambda} \cos \lambda_g$  bezogen auf die Geschwindigkeit am Äquator. Die über die **Breitengrade gemittelte Umfangsgeschwindigkeit**  $\lambda_g^{\circ} v_U$  ergibt sich mit  $v_{\lambda} = r_{\lambda} \omega_E (\approx 465,1 \text{ m/s})$  zu:

$$\lambda_g^{\circ} v_U = r_{\lambda} \omega_E \int_0^{\pi/2} \cos \lambda_g d\lambda_g = \frac{2 r_{\lambda} \omega_E}{\pi} \quad \approx 296,09 \text{ m/s} \quad (15)$$

Bei einer Kreisbewegung ist die zeitgemittelte (Quer-)Geschwindigkeit gemäß<sup>[9]</sup>  $t^{\circ} v_q = 2v_U/\pi$ . Die sowohl über die Zeit als auch über die Breitengrade **gemittelte Geschwindigkeit**  $t;\lambda_g^{\circ} v_U$  der Ladungsträger beträgt somit:

$$t;\lambda_g^{\circ} v_U = \frac{2}{\pi} \lambda_g^{\circ} v_U = \frac{4 r_{\lambda} \omega_E}{\pi^2} \quad \approx 188,5 \text{ m/s} \quad (16)$$

Zeitgemittelte Flußdichte  $t^{\circ} B$  in einem Raumpunkt geht aus dem Produkt zeitgemittelter Flächenladungsdichte  $t^{\circ} \sigma$  mit zeitgemittelter Feldmittengeschwindigkeit  $t^{\circ} v$  hervor<sup>[10]</sup>. Mit obigem gilt für das Erdmagnetfeld daher:

$$t^{\circ} B_E = \mu_0 \sigma_{EO} \cdot t;\lambda_g^{\circ} v_U / 0,95 \quad \approx 2,553 \cdot 10^{-5} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 25,53 \mu\text{T} \quad (17)$$

Ergebnis (17) ist die gemittelte Flußdichte auf einer Halbkugeloberfläche (und wie zu erwarten kleiner als die am Äquator auftretende). Der gesamte durch diese Fläche verlaufende magnetische Fluß ist also  $\Phi_E$ :

$$\Phi_E \approx 2\pi r_{\lambda}^2 \cdot t^{\circ} B_E \quad \approx 6,53 \cdot 10^9 \text{ V} \cdot \text{s} \quad (18)$$

Immerhin stimmt dieser Schätzwert mit dem aus (12) auf anderem Weg hergeleiteten nahezu überein.

Magnetfeld-Energie und die diese verursachende Elektroföld-Energie stehen zueinander im Verhältnis:

$$W_{mE} : W_{eE} \approx 1 : 6,7 \quad (19)$$

Also läßt sich das Erdmagnetfeld nach obiger Theorie mit nur wenigen **gegebenen Werten** berechnen.

#### 4. Kommentar, Folgerung

Von den geophysikalischen Zusammenhängen her spricht einiges dafür, daß das Erdmagnetfeld (auch) von dem Erdball anhaftenden und durch Erdrotation bewegten freien Ladungen verursacht wird. Diese Idee läßt nicht etwa *Blacketts* Vorschlag wieder aufleben.

Im vorausgegangenen Rechengang führen bekannte Erdmagnetfeld-Werte, in übliche Gleichungen für Magnetfeldberechnungen eingebracht, zur Bestätigung weiterer Werte des Erdmagnetfelds. Der zugrundeliegende Gedanke, daß durch Erdrotation bewegte Ladungsträger, zumindest einen Großteil des Erdmagnetfelds, verursachen, ist somit naheliegend und diskutabel, zumal andere bisher erwogene Hintergründe viele Fragen unbeantwortet lassen.

Das aufgezeigte Ursachenprinzip ist auf Sterne, Planeten und Monde übertragbar. Bedingung für ein Magnetfeld eines Himmelskörpers ist also, daß sich dieser dreht und elektrisch „geladen“ ist. Dabei sind eingenommene Feldform und erreichte Flußdichte hauptsächlich von Winkelgeschwindigkeit und vorhandener Ladung abhängig.

Rechnersimulationen zeigen, die Flußdichte eines Himmelskörpers sei hauptsächlich von der Energiemenge abhängig, die in Form von Licht und Wärme ins Weltall abgestrahlt wird<sup>[1]</sup>. Wie jedoch begründet dies Magnetfeldumpolungen?

Mit obiger Theorie lassen sich die erheblichen Unterschiede in den Flußdichten der Planeten, der Sonne und insbesondere vieler Sterne nun vielleicht erklären.

Ein konsequenter Versuch, die Magnetfelder der Sonnenplaneten zu interpretieren:

**Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun** haben ein bedeutend stärkeres Feld als die Erde, sind also vermutlich entsprechend stärker geladen. Da **Jupiter** entgegengesetzt magnetisiert ist, besteht dort womöglich ein Elektronenmangel. Weil **Mars** nur schwach magnetisiert ist, ist er aktuell gering geladen. Auch **Merkur** hat eine geringere Flußdichte als erwartet – das Produkt aus Ladungsdichte und Umfangsgeschwindigkeit ist bei ihm relativ gering. **Venus** ist gar nicht magnetisch und polt sich eventuell gerade um.

Warum die Planeten zu gleichen Zeiten unterschiedlich geladen (magnetisiert) sind, bleibt eine interessante Frage.

Das Erdfeld erlebt während der Sonnenflecken in einem Zyklus von etwa 11 Jahren „magnetische Stürme“ und wird durch diese um > 1% gestört. Auch das beruht auf Wechselwirkungen, die eher für als gegen obige Theorie sprechen.

Obleich der Kompaß vor 1000 Jahren erfunden wurde, stehen wir heute vor mehr unbeantworteten Fragen als jemals zuvor. Auch dieser Aufsatz wirft ggf eher weitere Fragen auf, als daß er eine schlüssige Antwort liefert.

Kiel, im März 2012      *hwm.k@kielnet.net*

#### 5. Quellenverzeichnis

[1] <http://www.cosmiq.de/qa/show/2632811/wie-funktioniert-magnetismus/>

[2] *KÖRBER, hans wm: Über die Anomalie magnetischer Momente – heuristisch mathematisch betrachtet am Elektron*, ein unter diesem Titel seit März 2012 an diverse dt Physik-Institute und bedeutende Physik-Theoretiker persönlich versandter Aufsatz

[3] *KÖRBER, hans wm: ELEKTRONEN-Bewegungen* Teil 1, 2. Aufl: Edition SAPIENTIA, pro literatur Verlag, Augsburg (2009)  
in Ergänzung vom Verfasser:

[4] *Konvergenz von fiktiver Physik und Realität – Naturkonstanten aus einem neuen Elektron-Modell erklärt*; ein unter diesem Titel seit März 2011 an diverse dt Physik-Institute und bedeutende Physik-Theoretiker persönlich versandter Aufsatz

[5] [http://de.wikipedia.org/wiki/Erdmagnetfeld#Form\\_und\\_St.C3.A4rke](http://de.wikipedia.org/wiki/Erdmagnetfeld#Form_und_St.C3.A4rke)

[6] <http://www.physik.tu-dresden.de/praktikum/gpp/Anleitungen2/MF.pdf>

[7] [http://de.wikipedia.org/wiki/Erdmagnetfeld#Entstehung\\_und\\_Aufrechterhaltung\\_.28Geodynamo.29](http://de.wikipedia.org/wiki/Erdmagnetfeld#Entstehung_und_Aufrechterhaltung_.28Geodynamo.29)

[8] in <sup>[Q3]</sup> Seite 18 Gleichung (1.2.8)

[9] *The 2010 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants*, aktualisierte Werte vom Juni 2011:  
<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt>

[10] in <sup>[Q3]</sup> Seite 27 Gleichung (1.3.12)

[11] in <sup>[Q3]</sup> Seite 55 Gleichungen (1.6.2.5) und (1.6.2.6)

[12] [http://www.science-at-home.de/wikimag/index.php/Wie\\_stark\\_ist\\_das\\_Magnetfeld\\_bei\\_Himmelsk%C3%B6rpern%3F](http://www.science-at-home.de/wikimag/index.php/Wie_stark_ist_das_Magnetfeld_bei_Himmelsk%C3%B6rpern%3F)