

## MAGNETISMUS - EINE KOMMENTIERTE NACHLESE

ANTON HELD

Wilhelm Kребstraße 15, 5020 Salzburg

Die physikalische Erscheinung des Magnetismus ist der Menschheit schon lange bekannt und die Griechen wussten auch um die Unterschiedlichkeit zu Elektrostatischen Effekten, die ja im Gegensatz dazu nicht nur bei ferromagnetischen Stoffen auftreten. *W. Gilbert*, 16.Jh., erkannte die Verschiedenheit der beiden Pole, die auch erhalten blieben, wenn man den Stab immer wieder halbierte.

Unsere Zeit entdeckte magnetische Eigenschaften der Elektronen, ihren doppelsinnigen Spin, womit unter anderem Aufspaltungen von Spektrallinien in Magnetfeldern erklärbar und die Theorie des Paramagnetismus „erhellt“ (*W. Pauli*, um 1932) wurde; magnetisch einheitlich orientierte Kristallbereiche, sog. Weiß'sche Bezirke, können sogar experimentell sichtbar gemacht werden.

Für diese mikroskopischen – und begrenzt makroskopischen – Bereiche scheinen daher die magnetischen Erscheinungen nicht mehr so geheimnisvoll. Woher aber kommt der Magnetismus großer, nicht homogener Körper, z.B. auch der Sonne oder der Erde?

Zuerst versucht man natürlich Analogieschlüsse: *Gilbert* vermutete, dass die Magneten immer in Richtung zu großen Magnetlager (Magnetit, Hämatit, Limonit etc.) in der festen Erdkruste zeigen; auch *K. F. Gauß*, 19.Jh., baute seine Erdmagnetfeldtheorie auf der Annahme auf, dass es im Erdkörper solche Inhomogenitäten gäbe. Das ermöglichte sogar, dass man für jeden Punkt der Erdoberfläche das Magnetische Potenzial  $V$  und die Kraftkomponenten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  als Funktionen der geographischen Ordinaten und gewisser empirisch bestimmbarer Konstanten berechnet werden konnte. Aber obwohl *Gauß* bis zu Gliedern 4.Ordnung (insgesamt 24 Koeffizienten) entwickelte, war die Aussagekraft über das Warum und Woher des Erdmagnetismus sehr gering.

Das ließ die Vermutung aufkommen, dass die Kräfte nicht nur im Innern ihren Ursprung hätten: *A.Schmidt* entwickelte daher *Gauß's* Formel bis zu Gliedern 6.Ordnung (47 Koeffizienten ! – und das ohne Computerhilfe !), berücksichtigte die Abplattung der Erde und führte die neuen Voraussetzungen in die Rechnung ein. dass der größte Teil der Magnetischen Wirkungen auf Kräfte beruhe, die innerhalb der oberen Erdkruste ihren Sitz haben und ein Potenzial besitzen, ein kleiner Teil

(etwa ein Vierzigstel des Ersteren) beruhe auf Kräften, die außerhalb ihren Sitz haben und auch ein Potenzial haben und noch ein wieder etwas größerer Teil beruhe auf den sogenannten Erdluftströmen, die kein Potenzial besitzen. Es ließ sich damit eine größere Übereinstimmung mit den real gemessenen Werten erreichen, aber auch nur wenig grundlegende Erkenntnisse.

*Bezold* vermutete positive elektrische Gleichströme, die im Erdinnern entgegen der Rotation und mit einer zu  $\cos\varphi$  ( $\varphi$ =geogr.Br.) proportionalen Stärke fließen und *Elsässer* ergänzte, dass diese thermoelektrischer Natur seien, nämlich durch Temperaturdifferenzen der Erdkernflüssigkeiten bedingt. Für das Erdmagnetfeld folgerte daraus  $V/R = 0,33 \cos\varphi$  ( $R$  = Erdradius;  $V$  = magn. Potenzial).

*Barnett, Wilson* u.a. haben auch die Erddrehung miteinbezogen und in realen Experimenten mit rotierenden Eisenkörpern sogar recht passable Ergebnisse bekommen – auf die Erde angewendet, waren aber die Werte um  $10^{10}$  zu klein. *Sutherland* erweiterte durch die Annahme, dass die positive Ladung des Erdkerns durch eine negative Oberflächenladung kompensiert wird. Um aber hiermit realistische Größenordnungen der Magnetwerte zu bekommen, müsste die elektrische Ladung  $10^8$  V/cm und die Intensität  $10^9$  A sein – eine unwahrscheinliche Situation, da in der Erde als guter Leiter so große Felder nicht stationär sein können. Da machte um die Jahrhundertmitte der Theoretische Physiker *P.M.S. Blackett* (Cambridge) eine Entdeckung: Bei Sonne und Erde (und einem Fixstern – siehe unten!) hat das Verhältnis Magnetisches Moment ( $P$ ) zu Drehimpuls ( $U$ ) einen konstanten Wert, nämlich  $0,8 \cdot 10^{-15}$ , d.h.

(1)  $P/U = \text{const.}$  oder anders gesagt:

Das Magnetische Moment der Sonne (oder der Erde, oder des Fixsterns) ist proportional zum Drehimpuls des Himmelskörpers. Aus den Messungen lässt sich der Proportionalitätsfaktor ermitteln und ist

(2)  $P = \beta G^{1/2} c^{-1} U$

( $G$  = Gravitationskonstante,  $c$  = relativistische Lichtgeschwindigkeit,  $\beta$  = Konstante nach Wahl des Einheitssystems).

Wird zur Vereinfachung die Erde als vollkommene Kugel angenommen und ihr Drehimpuls nach der Formel

(3)  $U = 2/5 \omega m R^2$

berechnet, was mit den gemessenen realen Werten: Erdradius  $R = 6,37 \cdot 10^8$  cm, Erdmasse  $m = 8 \cdot 10^{27}$  g und Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> ergibt

(4)  $U = 7,1 \cdot 10^{40}$  cm<sup>2</sup>gs<sup>-1</sup>

$$(5) \quad P = \frac{1}{2} H R^3$$

wenn die mittlere Magnetfeldstärke mit  $H = 0,61 \text{ T}$  angenommen werden darf, zu

$$(6) \quad P = 7,9 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2}$$

Das Blackett'sche Verhältnis ist daher

$$(7) \quad (P/U)_{\text{ERDE}} = 1,11 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s}$$

Die benötigten Daten zu diesen Berechnungen sind auch von der Sonne bekannt und ergeben:

$$(8) \quad (P/U)_{\text{SONNE}} = 0,79 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s}$$

In der relativistischen Atomphysik kennt man die analoge Beziehung zwischen dem Magnetischen Moment und dem Drehimpuls für das *Bohr'sche* Magneton

$$(9) \quad (P/U)_2 = e/2mc = 0,88 \cdot 10^7 \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s}$$

Setzt man das arithmetische Mittel aus  $(P/U)$  für Erde und Sonne gleich  $(P/U)_1$ , so gilt schließlich

$$(10) \quad (P/U)_1 / (P/U)_2 = 1,68 \cdot 10^{-22} \text{ (dimensionslos)}$$

Es fällt sofort auf, dass hier eine größenordnungsmäßige Gleichheit mit der bekannten Beziehung zwischen der Masse  $m$  und der Ladung  $e$  eines Elektrons besteht:

$$(11) \quad (m/e) G^{1/2} = 4,9 \cdot 10^{-22} \text{ (dimensionslos)}$$

Daraus schließt nun *Blackett*, dass  $(10) = (11)$  gilt, also

$$(12) \quad (P/U)_1 = \beta (m/e) G^{1/2} (P/U)_2$$

worin  $\beta$  eine numerische Konstante von der Größenordnung 0,25 wäre, und durch Verknüpfung mit (2) und (3) lässt sich folgern

$$(13) \quad P = \beta (G^{1/2}/2c) U$$

In Worten: Das Magnetische Moment (populär: der Magnetismus) eines Massenkörpers und sein Drehimpuls (populär: seine Rotation) hängen ursächlich zusammen.

Die Einfachheit dieses Resultates lässt es glaubhaft erscheinen, dass es eine tiefere physikalische Bedeutung hat, vor allem auch, weil nach der Allgemeinen Feldtheorie von *Einstein-Schrödinger* tatsächlich in elektrisch neutralen Körpern Magnetismus zulässig wäre (experimentell aber noch nicht nachgewiesen wurde).

Es war für die Physiker auch eine große Befriedigung, dass beim Bearbeiten von astronomischen Daten, die *Babcock* schon 1947 für den Fixstern *Virgo 78* bekanntgegeben hat, die *Blackett*'sche Vermutung der allgemeinen Gültigkeit von  $(P/U) = \text{const.}$ , wieder bestätigt wurde:

Virgo 78:  $m = 4,6 \cdot 10^{33} \text{ g}$ ,  $R = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ cm}$ ,  $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $H = 1500 \text{ T}$ , woraus folgt:

$$\begin{aligned} \text{Erde} & \dots\dots\dots P/U = 1,11 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s} \\ \text{Sonne} & \dots\dots\dots P/U = 0,79 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s} \\ \text{Fixstern Virgo} & \dots\dots\dots P/U = 0,81 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ s} \end{aligned}$$

Auch aus Arbeiten anderer Physiker ergeben sich Hinweise: So hat *H.A. Wilson* schon 1923 eine Abänderung der allgemeinen Elektromagnetischen Gleichungen (*Maxwell*) vorgeschlagen durch das Einbringung der Voraussetzung, dass eine Masse  $m$ , die mit der Geschwindigkeit  $v$  in Bewegung ist, auch wenn sie elektrisch neutral ist, um sich ein Magnetfeld erzeugt; In Analogie zum Magnetfeld einer bewegten Ladung, ließe sich dann das Feld durch den Ausdruck berechnen:

$$(14) \quad H = - \frac{G^{\frac{1}{2}} m}{c r^3} [\vec{v} \cdot \vec{r}] \text{ T}$$

Für eine vollkommene Kugel mit dem Radius  $R$  ergäbe sich

$$(15) \quad P = \frac{1}{5} \frac{G^{\frac{1}{2}}}{c} \omega m R^2$$

und dies mit (3) kombiniert, ergibt, bis auf eine Konstante die *Blackett*'sche Vermutung (2).

Scheint sich auch die Konstanz von  $P/U$  zu bestätigen, so sagt diese Erkenntnis doch nichts aus über das „Warum“ Wieder gibt es natürlich ein Suchen und Überlegen. So zeigt *Blackett* selbst, dass die Konstanz zerstört wird, wenn man die

der Realität entsprechende Tatsache, nämlich, dass die Massendichte und die Winkelgeschwindigkeit, vor allem bei gasförmigen Körpern, nach dem Kern hin zunimmt, mit einbezieht. Für eine zentrale Verdichtung gilt dann

	$P=1/2H_p R^3$	$k$	$U=2/5k\omega m R^2$	$P/U$	$\beta$
ERDE	$7,9 \cdot 10^{25}$	0,88	$6,22 \cdot 10^{40}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$	0,30
SONNE	$8,9 \cdot 10^{33}$	0,16	$1,80 \cdot 10^{48}$	$4,9 \cdot 10^{-15}$	1,14
VIRGO 78	$2,1 \cdot 10^{36}$	0,16	$4,2 \cdot 10^{50}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	1,16

und hier fällt auf, daß  $\beta$ , gewonnen aus dem Ausdruck

$$(16) \quad \beta = \frac{5}{2} \frac{H_p R c}{k \omega m G^{\frac{1}{2}}}$$

für Sonne und Virgo 78 praktisch gleich, für die Erde aber davon sehr verschieden ist. Besonders hohe Massendichten haben Fixsterne der Gruppe „Weiße Zwerge“, vielleicht ergeben sich von dorthier Entscheidungshilfen.

Es sei noch angedeutet, dass *Blackett's* Idee einer Verknüpfung zwischen Gravitation und Elektromagnetismus auch anderen Wissenschaftszweigen einigen Nutzen gebracht hat: Die *Wilson'sche* Beziehung  $\sigma = \sqrt{k} \rho$  ( $\sigma$  = Ladungsdichte,  $k$  = Newton'sche Gravitationskonstante,  $\rho$  = Massendichte) kann durch klassische Theorien nicht erklärt werden; der relativistische Ausdruck für die Totale Energie

$$(17) \quad E = \int_v \rho c^2 dv + \frac{1}{2} \int_{v_0} \rho \psi dv_0$$

enthält im zweiten Glied die sogenannte „Ergänzende Energie“ (-W); ihr Ursprung ist bislang unbekannt, durch die Tatsache aber, dass das erste Glied über einen nichteuklidischen Raum und das zweite über einen euklidischen Raum integriert werden, einwandfrei bedingt. Für einen Sonderfall, das *Schwarzschild'sche* innere Kraftfeld, lässt sie sich sogar berechnen

$$(18) \quad -W = 3/5 k m^2 a^{-1} \quad (a = \text{euklidischer Radius einer Kugel})$$

Blackett's Überlegungen folgend, nimmt man nun an (*I. Mariani*), dass die elektrische Energie, welche aus einer Ladungstrennung resultiert, gleich der „ergänzenden Energie“ ist und kommt damit bei den Folgebetrachtungen zur *Wilson*-Beziehung und die Totale Energie berechnet sich zu

$$(19) \quad E = 4\pi \frac{k^{\frac{3}{2}} \rho m a^2}{5 c^2}$$

was man als Oberflächenladung von der Dichte

$$(20) \quad \eta = \frac{k^{\frac{3}{2}} \rho m}{5 c^2}$$

interpretiert; auf die Erde angewendet, ergibt sich überschlagmäßig

$$(21) \quad \eta = - 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ e.s.E. cm}$$

was eine recht gute Übereinstimmung mit der experimentell gefundenen Tatsache bedeutet, dass die Oberfläche der Erde eine negative Ladung mit der Dichte

$$(22) \quad \eta = - 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ e.s.E. cm}$$

besitzt.

In der zweiten Hälfte des 20. Jh. wurde der Beobachtung des Erdmagnetfeldes, vor allem auch für die Raumfahrt, erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt und wesentliche Verbesserungen der Registrierapparaturen ermöglichten genauere Messdaten. Heute gibt es weltweit fast 200 magnetische Observatorien. Die neuesten Vorstellungen über die Quellen des Erdmagnetfeldes soll uns ein Auszug aus einem Bericht über die geomagnetischen Forschungen am Adolf-Schmidt-Observatorium in Potsdam, erschienen in den „Wissenschaftlichen Nachrichten, Nr. 113 vom Juli-August 2000“, zeigen:

„Das geomagnetische Feld lässt sich im wesentlichen auf die drei Quellen, den geomagnetischen Dynamo im Erdkern, die Magnetisierung der Erdkruste und die Ströme in Ionosphäre und Magnetosphäre, zurückführen. Keine der genannten Quellen ist konstant. Sie ändern sich durch noch nicht vorhersagbare Prozesse, die in ihnen ablaufen.“

Das an der Erdoberfläche messbare Magnetfeld stammt zu etwa 94% aus dem Erdinneren. Dort läuft ein Prozess ab, der als Geodynamo bezeichnet wird und dessen detaillierte Gesetzmäßigkeiten noch wenig bekannt sind. Im äußeren Erdkern, der aus einer elektrisch leitenden Flüssigkeit besteht, bilden sich thermisch getriebene Konvektionswirbel aus. Ein hierdurch getriebener selbsterregender Generator erzeugt elektrische Ströme, die primär ein toroidales Magnetfeld im Erdkern hervorrufen, welches an der Erdoberfläche nicht zu beobachten ist. Die Wirkung des sekundär erzeugten poloidalen Feldes kann dagegen an der Oberfläche gemessen werden. Dieses sogenannte Hauptfeld unterliegt Schwankungen, auch Säkularvariationen genannt, deren Perioden von einigen Jahren bis Jahrmillionen reichen.

Etwa die Hälfte der verbleibenden 6% rührt vom Krustenfeld her. Die räumliche Verteilung der Feldstärke steht im direkten Zusammenhang mit der Verteilung der magnetisierbaren Materie in der oberen Erdkruste. Variationen laufen sehr langsam im Zeitmaß geologischer Prozesse ab.

Die restlichen 3% des Erdmagnetfeldes werden durch ionosphärisch-magnetosphärische Ströme verursacht. Die Quelle ist der Sonnenwind, ein kontinuierlich von der Sonne ausgehender Partikelstrom. Das hierdurch hervorgerufene magnetische Außenfeld zeigt starke Variabilitäten. Das Spektrum der Variationen weist deutliche Maxima bei Perioden von 1 Tag, 27 Tagen, 1 Jahr und 11 Jahren auf, die alle auf den dominierenden Einfluss der Sonne hinweisen. Daneben gibt es jedoch auch noch die kürzer periodischen magnetischen Pulsationen, die durch Resonanzerscheinungen in der Magnetosphäre zustande kommen.“ (Berichterstatter: Adolf Best und Volker Haak)

## Literatur

P.M.S. BLACKETT, F.R.S. Universität Manchester: Das Magnetfeld massereicher rotierender Körper; in Zschr. Nature, 4046; 1947

Anmerkung: Diese ältere Literatur bedingt, dass die physikalischen Größen noch nach dem heute veralteten CGS-System dimensioniert sind. Für unsere nur vergleichenden Betrachtungen stört das aber nicht.



# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg](#)

Jahr/Year: 2001

Band/Volume: [13](#)

Autor(en)/Author(s): Held Anton

Artikel/Article: [MAGNETISMUS - EINE KOMMENTIERTE NACHLESE. 79-86](#)