

Werk

Jahr: 1936

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:12

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0012

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0012

LOG Id: LOG_0026

LOG Titel: Über eine neue physikalische Erklärung der Ursache des Erd- und Sonnenmagnetismus und des luftelektrischen Vertikalstromes

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain there Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Über eine neue physikalische Erklärung der Ursache des Erd- und Sonnenmagnetismus und des luft- elektrischen Vertikalstromes

Von **H. Haalek**, Potsdam — (Mit 2 Abbildungen)

Durch Betrachtung der in einer ionisierten festen Masse zwischen den Ionen und den freien Elektronen bestehenden elektrostatischen Kräfte wird zunächst festgestellt, daß in einer Masse, welche einem sehr hohen Druck ausgesetzt ist, eine gewisse Ladungstrennung eintreten muß, wenn in ihr ein Druckgradient vorhanden ist; und zwar ergibt sich ein positiver Ladungsüberschuß in den Teilen höheren, eine negative Ladung in den Zonen geringeren Drucks. Die Rotation einer solchen Masse erzeugt ein magnetisches Feld, welches — indem die sich aus der Theorie ergebenden mathematischen Beziehungen auf Erde und Sonne angewandt werden — qualitativ und quantitativ dem an diesen gemessenen Magnetfeldern entspricht. Darüber hinaus wird gezeigt, daß sich die Ursache des luftelektrischen Vertikalstromes ebenfalls auf Grund der entwickelten Theorie befriedigend erklären läßt.

Von den Versuchen, die Erscheinung des Erdmagnetismus physikalisch zu erklären, haben die Theorien die größte Wahrscheinlichkeit für sich, welche annehmen, daß die Ursache irgendwie mit der Rotation der Erde in Zusammenhang steht. Gestützt wird diese Annahme dadurch, daß das beobachtete Erdfeld im wesentlichen rotationssymmetrisch ist, und daß durch die Beobachtungen des Zeemann-Effekts an der Sonne ein qualitativ dem erdmagnetischen ähnliches sonnenmagnetisches Feld festgestellt worden ist. Die bisherigen physikalischen Erklärungsversuche*) können jedoch nicht befriedigen, da das Verhalten der Materie unter den physikalischen Bedingungen, welche der experimentellen Beobachtung zugänglich sind, keine Schlüsse erlaubt, daß durch die Rotation einer Masse ein magnetisches Feld von einer solchen Stärke erzeugt werden kann. Es bleibt daher — will man nicht zu dem Ausweg greifen, kleine, aber fundamentale Abweichungen von den elektrodynamischen Grundgesetzen anzunehmen — nur die Annahme übrig, daß in dem physikalischen Aufbau des Erd- bzw. Sonneninnern noch irgendwelche uns unbekannt Besonderheiten vorhanden sind, aus welchen sich eine solche rotationsmagnetische Wirkung ergibt. Es liegt nun nahe, diese auf den Einfluß der im Erd- bzw. Sonneninnern herrschenden abnorm hohen Drucke und Temperaturen zurückzuführen, obwohl wir irgendwelche einigermaßen sichere Anhaltspunkte, wie sich die Materie unter solchen Bedingungen verhält, bis jetzt nicht kennen. Eine solche Erklärungsmöglichkeit soll im folgenden erörtert werden.

Die Größenordnung der in Frage kommenden *Temperaturen und Drucke* ist folgende: Im Erdinnern steigt der Druck bis auf etwa 2 bis 3 Millionen Atmosphären, während die Temperatur, abgesehen von der äußeren Gesteinsrinde, zu

*) Eine Zusammenstellung der bisherigen Theorien findet sich in: Th. Schlomka, Zur physikalischen Theorie des Erdmagnetismus, Zeitschr. f. Geophys. 9, (1933) Heft 1/2.

einigen tausend Grad Celsius (wahrscheinlich nicht mehr als 2000°) angenommen werden kann. Im Sonneninnern erreicht der Druck erheblich größere Beträge, bis über eine Milliarde Atmosphäre im Mittelpunkt; die Schätzungen der Temperatur, die an der Sonnenoberfläche zu etwa 5 bis 6000° C festgestellt worden ist, gehen für das Sonneninnere weit auseinander und belaufen sich bis auf einige Millionen Grad. Den Hauptbestandteil für den Aufbau des Erdinnern bildet das Eisen und seine Verbindungen; für die Beurteilung der stofflichen Zusammensetzung des Sonneninnern fehlt dagegen jeder Anhaltspunkt.

Für die folgenden Überlegungen werden wir die Erde und Sonne der Einfachheit halber als Kugeln vom Radius R annehmen, welche mit der Winkelgeschwindigkeit ω um sich selbst rotieren und in welchen die Dichte σ radial vom Mittelpunkt bis zur Oberfläche hin abnimmt.

1. *Grundlegende atomphysikalische Betrachtungen.* Was den molekularen Aufbau der Masse anbelangt, so können wir ausgehen von der Natur des Eisens oder allgemein der Metalle. Die Atome dieser Elemente sind leicht geneigt, ein oder mehrere Elektronen abzuspalten, und die physikalische Vorstellung von der elektrischen Leitfähigkeit geht dahin, daß freie Leitungselektronen sich entweder zwischen den Atombereichen hindurchbewegen oder von Atombereich zu Atombereich übergehen. Nach der gaskinetischen Theorie der freien Elektronen (Lorentz, Wien, Debye, Bohr u. a.) erfüllen diese den Raum zwischen den wirklichen Atomen, gehorchen den idealen Gasgesetzen und stehen in thermischem Gleichgewicht mit den Metallatomen. Auch die Auffassung von Stark, Lindemann, Haber u. a., welche annehmen, daß die Elektronen durch starke Direktionskräfte an Gleichgewichtslagen gebunden sind, die ihrerseits wieder Gitter bilden, und sich als Ganzes oder in Ketten durch die Ionengitter bewegen, gehören hierher. Nach der Auffassung von Lenard, Frenkel u. a. gehen die Elektronen, und zwar besonders die Valenzelektronen, infolge der Nähwirkung und den thermisch-kinetischen Zusammenstößen der Atome von einem zum andern über. Welche dieser Ansichten auch mehr Wahrscheinlichkeit für sich hat, auf alle Fälle können wir annehmen, daß eine gewisse Ionisation bei jeder leitfähigen Materie vorhanden ist, und daß Temperatur und Druck die wesentlichsten Ursachen der starken Ionisation in einer festen Masse sind; und zwar ist es wahrscheinlich, daß bei den abnorm hohen Temperaturen und Drucken außer den Schalen der Valenzelektronen noch weitere von den äußeren Elektronenhüllen der Atome zerstört werden*). Wir können uns also ein festes Ionengitter vorstellen, welches durch den hohen

*) Es ist anzunehmen, daß die Stärke der Ionisation nicht proportional von Druck und Temperatur ansteigt, sondern daß — ebenso wie die Materie, wenn Druck und Temperatur in dem uns bekannten Bereich bestimmte kritische Werte übersteigen, sprungweise in einen neuen Zustand übergeht, wobei sich auch die thermischen und elastischen Eigenschaften ändern (vgl. S. 120) — von einem bestimmten kritischen Punkte an durch Zerstörung der äußeren Elektronenschalen eine Ionisation hervorgerufen wird, die dann durch weiteres Ansteigen von Druck und Temperatur nicht mehr wesentlich verändert wird, bis eben wieder ein neuer kritischer Punkt erreicht wird.

Druck eng zusammengepreßt wird und in welchem die einzelnen Ionen infolge ihrer außerordentlich großen thermisch-kinetischen Energie heftige Schwingungen um ihre Gleichgewichtslagen ausführen. Innerhalb der engen Zwischenräume zwischen den Ionen mit ihrem positiven Ladungsüberschuß bewegen sich die freien Elektronen, die ebenfalls eine mittlere Gleichgewichtslage annehmen.

Da die angenommene kugelförmige Masse als elektrisch neutral vorausgesetzt wird, so muß die Gesamtsumme der freien positiven und negativen Ladungseinheiten gleich Null sein. Das gilt für die Gesamtheit der Masse. Trifft es aber auch zu für jedes beliebige, hinreichend große Volumelement, oder *besteht eine Möglichkeit, daß die Dichte der positiven Ladungseinheiten anders mit der Entfernung vom Mittelpunkt abnimmt als die Dichte der freien Elektronen?* Man ist zunächst wohl geneigt, eine solche Möglichkeit abzulehnen, denn die großen zwischen den Ionen und freien Elektronen bestehenden elektrischen Anziehungskräfte wirken einer solchen Trennung der Ladungseinheiten entgegen. Die folgende Überlegung führt jedoch zu einem anderen Ergebnis:

Die Gesamtheit der in einer ionisierten Masse zwischen den freien Elektronen und den Ionen wirkenden elektrostatischen Kräfte (von den interatomaren zwischen den umlaufenden Elektronen und den Atomkernen bestehenden Kräften können wir ebenso wie von den elektromagnetischen und den Gravitationskräften im folgenden absehen) denken wir uns in folgende drei Gruppen eingeteilt:

1. die *abstoßenden Kräfte* zwischen den einzelnen Ionen, deren Gesamtheit als die *Expansionskraft des Ionengitters* bezeichnet werden kann,
2. die *abstoßenden Kräfte* zwischen den freien Elektronen, deren Gesamtheit die *Expansionskraft des Elektronengitters* bilden,
3. die *anziehenden Kräfte* zwischen den Ionen und den freien Elektronen, welche in ihrer Gesamtheit das Ionen- und das Elektronengitter gleichmäßig miteinander verkoppeln.

Um festzustellen, wie sich diese Kräfte bei zunehmendem Druck ändern, müssen wir die Einzelkomponenten, aus denen sie sich zusammensetzen, betrachten, d. h. die Kräfte, welche zwischen den einzelnen Ionen und freien Elektronen *in der Nahzone* wirksam sind:

Die freien Elektronen ebenso wie die Atomkerne sind Punktladungen. Die Ionen können auf größere Entfernungen ebenfalls als einfache Punktladungen aufgefaßt werden; auf nahe Entfernungen kommt aber die Ladungsverteilung innerhalb des Ions, also die Tatsache, daß ein positiv geladener Kern von negativ geladenen Elektronen in verschiedenen Abständen umkreist wird, zur Geltung. Entsprechend der obigen Einteilung spielen folgende drei elektrostatischen Kräfte eine Rolle:

1. die Abstoßungskraft zwischen zwei freien Elektronen,
2. die Abstoßungskraft zwischen zwei Ionen,
3. die Anziehungskraft zwischen einem Ion und einem Elektron.

Die erstere ist, da es sich um Punktladungen handelt, ohne weiteres durch das Coulombsche Gesetz gegeben als umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes r :

$$K_1 = \frac{e^2}{r^2} \dots \dots \dots (1)$$

Zwischen zwei verschieden geladenen Ionen entspricht die Anziehung ebenfalls dem Coulombschen Gesetz, wenn der Abstand hinreichend groß ist. Die Kraft, welche sie an dem Zusammenstürzen hindert, entspringt der elektrostatischen Abstoßung der die Atomkerne umkreisenden Elektronen. Sobald sich die beiderseitigen Elektronenhüllen hinreichend nahe gekommen sind, überwiegt die gegenseitige Abstoßung die Anziehung der resultierenden Ionenladungen. Diese abstoßende Kraft wird daher in der Atomphysik in erster Näherung als eine mit einer höheren Potenz der Entfernung abnehmende Zentralkraft angesetzt. Das Entsprechende gilt auch für die Kräfte, welche zwischen einem Ion und einem *freien* Elektron wirksam sind. Sind zwei Ionen positiv (m_1 - bzw. m_2 -fach) geladen, so kann man demnach für ihre gegenseitig *abstoßende Kraft* ansetzen:

$$K_2 = K'_2 + K''_2 = m_1 m_2 e^2 \left\{ \frac{1}{r^2} + \frac{C_1}{r^{n_1}} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

Entsprechend kann man für die *anziehende Kraft* zwischen einem m -fach positiv geladenen Ion und einem *freien* Elektron ansetzen:

$$K_3 = K'_3 + K''_3 = m e^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{C_2}{r^{n_2}} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Die Konstanten C_1 und C_2 sind positiv und von der stofflichen Beschaffenheit der Materie (d. h. dem Aufbau der einzelnen Elektronenschalen) abhängig. Sie stehen ebenso wie der Abstoßungsexponent n in Beziehung zur Kompressibilität der Masse, also zu ihren elastischen Eigenschaften. In der Atomphysik hat man aus der Kompressibilität den Abstoßungsexponenten n berechnet (Born, Landé u. a.) und daraus Werte erhalten, die in der Größenordnung $n = 9$ liegen, aber für die einzelnen Elemente verschieden sind. Für die vorliegenden Betrachtungen spielt die Größe der Konstanten C_1 und C_2 und der Exponenten n_1 und n_2 keine Rolle.

Die Differentiation der Gleichungen (1) bis (3) ergibt:

$$dK_1 = -2 \frac{e^2}{r^3} \cdot dr = -2 K_1 \cdot \frac{dr}{r},$$

$$dK_2 = -2 K'_2 \cdot \frac{dr}{r} - n_1 K''_2 \cdot \frac{dr}{r},$$

$$dK_3 = -2 K'_3 \cdot \frac{dr}{r} + n_2 K''_3 \cdot \frac{dr}{r}.$$

Daraus folgt: Ist dr negativ, d. h. wird die ionisierte Masse gleichmäßig (d. h. ohne relative Lageänderung der Ionen und Elektronen zueinander) komprimiert, so

nimmt die abstoßende Kraft zwischen zwei freien Elektronen und mehr noch diejenige zwischen zwei positiv geladenen Ionen in stärkerem Maße zu als die anziehende Kraft zwischen einem positiv geladenen Ion und einem freien Elektron. Mit anderen Worten: *Mit steigendem Druck wächst die Expansionskraft des Ionen- und diejenige des Elektronengitters in stärkerem Maße als ihre gegenseitige Anziehungskraft.*

Wir überlegen uns jetzt folgendes *Gedankenexperiment*: Man denke sich ein offenes, mit Materie gefülltes Gefäß (Fig. 1), dessen Seitenwände und Boden absolut starr und dicht seien. Der Gefäßinhalt werde durch eine horizontale Platte AB in

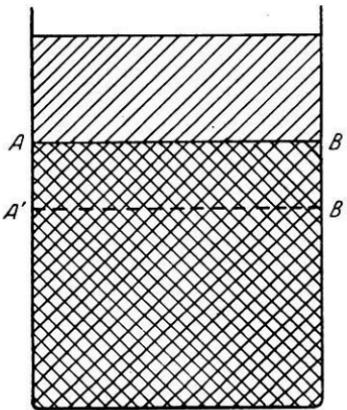


Fig. 1

Druckwirkung auf eine stark ionisierte feste Masse

zwei Teile geteilt. Diese Platte drücke mit einem sehr starken Druck auf den unterhalb dieser Platte befindlichen Teil der Masse, welcher eine sehr hohe Temperatur besitze. Über den oberhalb von AB befindlichen Teil der Masse brauchen keinerlei Voraussetzungen gemacht zu werden. Durch den hohen Druck werden die Atome der unteren Masse so stark zusammengepreßt, daß infolge der thermisch-kinetischen Atomstöße und der Nahewirkung der Atome die äußeren Elektronenschalen zerstört werden, also eine starke Ionisation eintritt. Die Druckplatte werde nun nicht als absolut dicht angenommen, sondern sie sei so engmaschig, daß sie für Ionen undurchlässig, für die freien Elektronen, welche an räumlicher Ausdehnung nur den rund 10^5 ten Teil der Ionen einnehmen, dagegen durchlässig ist.

Gegen den Druck der Platte AB wirkt die Expansionskraft der unteren Masse, die sich nach S. 114 zusammensetzt aus der Expansionskraft des Ionengitters und derjenigen des Elektronengitters. — Beide sind miteinander verkoppelt durch die zwischen den Ionen und den freien Elektronen bestehenden Anziehungskräfte, welche bestrebt sind, die freien Ladungen gleichmäßig zu verteilen, so daß in jedem Massenelement die Anzahl der freien Ladungseinheiten der Ionen gleich derjenigen der freien Elektronen ist. Nun beachte man die Wirkung dieser drei Kräfte: Die Expansionskraft des Ionengitters wirkt unmittelbar gegen die Druckplatte AB , die Expansionskraft des Elektronengitters dagegen nicht direkt, weil die Platte ja durchlässig für die freien Elektronen sein soll, wohl aber indirekt, weil sie durch die zusammenhaltende dritte Kraft, ohne welche sich die freien Elektronen durch AB hindurch in dem oberen Teil der Masse ausbreiten würden, mit dem Ionengitter gekoppelt ist, und dadurch den Gegendruck des Ionengitters gegen AB verstärkt.

Nun denken wir uns den Druck verstärkt, so daß die untere Masse komprimiert wird, die Platte AB und mit ihr die auf ihr liegende obere Masse sich also bis $A'B'$

verschiebe. Nach S. 115 nimmt dadurch die Expansionskraft des Elektronengitters in stärkerem Maße zu als die zusammenhaltende Kraft \mathfrak{B} . Das hat zur Folge, daß ein Teil der freien Elektronen — mag es sich auch nur um einen verschwindend geringen Bruchteil der Gesamtzahl der freien Elektronen handeln (etwa $1 : 10^{18}$, vgl. S. 120) — durch die für sie durchlässige Platte AB gedrückt wird und sich in dem oberhalb befindlichen Teil der Masse ausbreitet, und zwar wird dieser Vorgang so weit gehen, bis in der unteren komprimierten Masse die Expansionskraft des Elektronengitters wieder im Gleichgewicht mit der die freien Elektronen zurückhaltenden Kraft \mathfrak{B} steht. Wir hätten somit *eine negative Ladung der oberhalb von AB befindlichen Masse und eine gleich große positive Ladung der unterhalb von ihr vorhandenen stark ionisierten Masse als Folge des abnorm großen Drucks der Platte AB auf die letztere.*

Dieses Gedankenexperiment läßt sich ohne weiteres *auf Erde und Sonne übertragen*: Die Platte AB wird durch die Materie selbst gebildet; sie ist durchlässig für die freien Elektronen, undurchlässig für die Ionen. Der Druck wird durch die Last der darüber befindlichen Massen, also als Wirkung der Schwerkraft, erzeugt; nur daß eben der Druck nicht wie in dem Gedankenexperiment an einer scharfen Fläche erzeugt wird, sondern allmählich von oben nach unten zunimmt. *Die abnorm hohen Drucke und Temperaturen im Innern der Kugel hätten also zur Folge, daß im inneren Teil der Masse die Dichte der freien positiven Ladungseinheiten der Ionen größer ist als diejenige der freien Elektronen, während in den äußeren Kugelschalen die Elektronendichte diejenige der positiven Ladungseinheiten übertrifft.* Einer solchen Schlußfolgerung haftet der Ableitung nach kein Zwang an; sie muß vielmehr als physikalisch durchaus begründet bezeichnet werden.

2. *Die theoretischen Beziehungen.* Wie sich die Dichte der freien Elektronen und diejenige der positiven Ladungsüberschüsse der Ionen quantitativ mit der Entfernung von Kugelmittelpunkt ändert, ist naturgemäß unbekannt. Wir können nur von dem qualitativen Ergebnis der atomphysikalischen Überlegungen im vorigen Abschnitt ausgehen, daß der Überschuß der Zahl d_+ der freien positiven Ladungseinheiten der Ionen gegen die Zahl d_- der freien Elektronen pro Volumeneinheit mit der Entfernung r vom Mittelpunkt abnimmt. Über die Stärke dieser Abnahme nehmen wir daher vier einfache voneinander verschiedene Gesetzmäßigkeiten an, welche als mehr oder weniger gute Annäherungen an die Wirklichkeit aufzufassen sind:

Fall A: Die Abnahme erfolge gleichmäßig mit der Entfernung r :

$$d_+ - d_- = \alpha_1 - \beta_1 r \dots \dots \dots (4a)$$

Fall B: Die Abnahme erfolge proportional dem Quadrat von r :

$$d_+ - d_- = \alpha_2 - \beta_2 r^2 \dots \dots \dots (4b)$$

Fall C: Die Abnahme erfolge proportional der dritten Potenz von r :

$$d_+ - d_- = \alpha_3 - \beta_3 r^3 \dots \dots \dots (4c)$$

wobei die α und β noch näher zu bestimmende Konstante bedeuten. Als vierter Fall werde für die Erde noch hinzugenommen:

Fall D: Der innere Teil der Erdkugel besitze einen gleichmäßigen Überschuß der freien positiven, die umgebende Kugelschale einen gleichmäßigen Überschuß der freien negativen Ladungseinheiten:

$$\left. \begin{aligned} d_+ - d_- = \alpha_4 \quad \text{für } 0 < r < R_0 \\ d_+ - d_- = \beta_4 \quad \text{für } R_0 < r < R \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4d)$$

Die Konstanten α können wir ermitteln aus der Bedingung, daß die ganze kugelförmige Masse elektrisch neutral, d. h. die Gesamtsumme der freien positiven und negativen Ladungseinheiten gleich Null sein soll. Im Fall A ist also:

$$\sum_M (d_+ - d_-) = 0 = \int_0^R 4 \pi r^2 (\alpha_1 - \beta_1 r) dr,$$

daraus folgt:

$$\alpha_1 = \beta_1 \frac{3}{16} R,$$

die erste der obigen Gleichungen (4) wird damit:

$$d_+ - d_- = \beta_1 \left(\frac{3}{4} R - r \right) \dots \dots \dots (5a)$$

und analog:

$$d_+ - d_- = \beta_2 \left(\frac{3}{5} R^2 - r^2 \right) \dots \dots \dots (5b)$$

$$d_+ - d_- = \beta_3 \left(\frac{1}{2} R^3 - r^3 \right) \dots \dots \dots (5c)$$

$$\alpha_4 = \beta_4 \frac{R^3 - R_0^3}{R_0^3} \dots \dots \dots (5d)$$

Die Konstanten β stehen in Beziehung zu dem *magnetischen Moment* \mathfrak{M} der *um sich selbst rotierenden Kugel*:

Eine Elektrizitätsmenge E , welche mit der Winkelgeschwindigkeit ω im Abstand ρ von der Rotationsachse rotiert, erzeugt das magnetische Moment:

$$E \frac{\omega \rho^2}{2}.$$

Die Ladungsmenge eines Volumenelements

$$dv = r^2 \cos \varphi d\psi d\phi dr$$

der Kugel ist:

$$e (d_+ - d_-) r^2 \cos \varphi d\psi d\phi dr,$$

wo e das elektrische Elementarquantum bedeutet. Als magnetisches Moment \mathfrak{M} der rotierenden Kugel ergibt sich also im Falle A:

$$\mathfrak{M} = \frac{\omega}{2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e \left[\beta_1 \left(\frac{3}{4} R - r \right) \right] r^2 \cos \varphi r^2 \cos^2 \varphi d\varphi d\psi dr.$$

Die Integration ergibt:

$$\mathfrak{M} = - \frac{\pi}{45} e \omega \beta_1 R^6 \dots \dots \dots (6 a)$$

und analog:

$$\mathfrak{M} = - \frac{16 \pi}{525} e \omega \beta_2 R^7 \dots \dots \dots (6 b)$$

$$\mathfrak{M} = - \frac{\pi}{80} e \omega \beta_3 R^8 \dots \dots \dots (6 c)$$

$$\mathfrak{M} = - \frac{4}{15} \pi e \omega \beta_4 R^8 (R^2 - R_0^2) \dots \dots \dots (6 d)$$

3. *Anwendung der Theorie auf Erde und Sonne.* Der Anwendung der aufgestellten mathematischen Beziehungen auf Erde und Sonne werden folgende numerische Werte zugrunde gelegt (alle Größen in CGS-Einheiten):

Erde	Sonne
$\mathfrak{M} = - 8 \cdot 10^{25}$	$\mathfrak{M} = - 8.84 \cdot 10^{33}$
$\omega = \frac{2 \pi}{86400} = 7.25 \cdot 10^{-5}$	$\omega = \frac{2 \pi}{86400 \cdot 31.5} = 2.27 \cdot 10^{-6}$
$R = 6.37 \cdot 10^8$	$R = 6.95 \cdot 10^{10}$
$R_0 = 0.55 \cdot R$ (d. h. Grenze des Erdkerns)	
$e = 1.591 \cdot 10^{-20}$ (el. magn.).	

Zunächst können wir feststellen, daß die an der Erde und Sonne gemessenen Magnetfelder qualitativ der aufgestellten Theorie entsprechen, d. h. die Richtung des gemessenen Feldes entspricht der nach den Gleichungen (6) sich ergebenden Richtung. Die Konstanten β ergeben sich mit den obigen numerischen Werten nach den Gleichungen (6) für die vier angenommenen Fälle zu:

Erde	Sonne
a) $\beta_1 = 0.015$	$\beta_1 = 2.9 \cdot 10^{-5}$
b) $\beta_2 = 1.7 \cdot 10^{-11}$	$\beta_2 = 3.0 \cdot 10^{-16}$
c) $\beta_3 = 2.45 \cdot 10^{-20}$	$\beta_3 = 4.0 \cdot 10^{-27}$
d) $\beta_4 = 1.13 \cdot 10^6$	

Setzen wir für die Konstanten β in den Gleichungen (5) diese numerischen Werte ein, so wird also das erdmagnetische und das sonnenmagnetische Feld auch quantitativ durch den abgeleiteten Effekt vollkommen erklärt.

Als Überschuß $d_+ - d_-$ der Zahl der positiven Ladungsüberschüsse der Ionen über die Zahl der freien Elektronen pro Volumeneinheit ergibt sich nach Gleichung (5):

1. Im Mittelpunkt:

	a) Erde	b) Sonne
a)	$d_+ - d_- = 7.2 \cdot 10^6 (11.4 \cdot 10^{-14})$	$= 1.5 \cdot 10^6 (2.4 \cdot 10^{-14})$
b)	$= 4.4 \cdot 10^6 (7.0 \cdot 10^{-14})$	$= 0.87 \cdot 10^6 (1.4 \cdot 10^{-14})$
c)	$= 3.15 \cdot 10^6 (5.0 \cdot 10^{-14})$	$= 0.67 \cdot 10^6 (1.1 \cdot 10^{-14})$
d)	$= 6.8 \cdot 10^6 (10.8 \cdot 10^{-14})$	

2. An der Oberfläche:

	a) Erde	b) Sonne
a)	$d_+ - d_- = -2.4 \cdot 10^6 (-3.8 \cdot 10^{-14})$	$= -0.5 \cdot 10^6 (-0.8 \cdot 10^{-14})$
b)	$= -2.9 \cdot 10^6 (-4.6 \cdot 10^{-14})$	$= -0.58 \cdot 10^6 (-0.9 \cdot 10^{-14})$
c)	$= -3.15 \cdot 10^6 (-5.0 \cdot 10^{-14})$	$= -0.67 \cdot 10^6 (-1.1 \cdot 10^{-14})$
d)	$= -1.13 \cdot 10^6 (-1.8 \cdot 10^{-14})$	

Die eingeklammerten Zahlen geben die Raumladung pro Volumeneinheit in el.-magn. CGS-Einheiten an.

Betrachten wir beispielsweise zum Vergleich eine Volumeneinheit des Eisens, so ist die Zahl N der Atome in der Volumeneinheit

$$N = \frac{L\sigma}{A},$$

wo $L (= 6.06 \cdot 10^{23})$ die Loschmidtsche Zahl und $A (= 55.6)$ das Atomgewicht, $\sigma (= 7.8)$ das spezifische Gewicht des Eisens bedeuten. Daraus ergibt sich $N = 8.5 \cdot 10^{22}$. Nehmen wir an, daß die Ionisierung des Eisens im Innern der Masse nur so stark ist, daß die Valenzelektronen (normales Eisen ist dreiwertig) als freie Elektronen sich innerhalb des Ionengitters bewegen, so wäre die Zahl der freien Elektronen pro Volumeneinheit $= 25 \cdot 10^{22}$; in Wirklichkeit wird die Zahl wohl noch mehrfach so groß sein (vgl. S. 113). Prozentual zur Gesamtzahl der freien Ladungseinheiten ist also die Verschiebung des Elektronengitters gegen das Ionengitter, welche durch die abnorm hohen Drucke im Innern der Erde und Sonne verursacht wird und das beobachtete Magnetfeld hervorruft, nur von sehr geringer Größenordnung (etwa $1:10^{18}$, vgl. S. 116).

Die Zahlenergebnisse lassen erkennen, daß die vier angenommenen Gesetzmäßigkeiten (vgl. S. 117) über die Dichteänderung der positiven Ladungsüberschüsse der Ionen und der Elektronen mit der Entfernung vom Kugelmittelpunkt nicht zu wesentlich verschiedenen Resultaten führen, so daß es also auf diese Annahme bei der Theorie nicht sehr ankommt. Die neutrale Zone, d. h. die Zone, in welcher die Zahl der freien positiven Ladungseinheiten gleich derjenigen der freien Elektronen ist, liegt für die vier angenommenen Gesetzmäßigkeiten nach den

Gleichungen (5) zwischen 0.55 und 0.75 R . Der Erdkern würde also positiv, der Gesteinsmantel negativ geladen sein, die neutrale Zone im Bereich der Zwischenschicht liegen. Ein ursächlicher Zusammenhang mit dem Aufbau des Erdinnern ist wahrscheinlich: An der Grenze des Erdkerns ($R_0 = 0.55 R$) ändern sich die elastischen Eigenschaften sehr plötzlich, indem die Geschwindigkeit der longitudinalen Erdbebenwellen plötzlich von 13 auf 8.5 km/sec abnimmt und der Durchgang von Transversalwellen durch den Erdkern bis jetzt nicht festgestellt werden können. *Es ist daher anzunehmen, daß in dieser Tiefe Druck und Temperatur einen kritischen Wert* (also etwa bei 2000° C Temperatur und rund 1.5 Millionen Atm. Druck) *überschreiten* (vgl. S. 113), *welcher im Zusammenhang mit der sprunghaften Änderung der elastischen Eigenschaften die starke Ionisation der Materie und die Trennung der Ladungen verursacht.*

Es liegt nahe, eine ähnliche Vermutung auch für die Sonne auszusprechen; zahlenmäßige Rechnungen würden jedoch wegen der anderen Verhältnisse (außerordentlich höhere Temperaturen und Drucke und wohl auch andere stoffliche Zusammensetzung) zu unsicher werden. Hinzuweisen wäre nur auf folgende Beziehung: Nach S. 120 ist die Ladung pro Volumeinheit für die Erde nahezu fünfmal so groß als bei der Sonne, auf die Masseneinheit bezogen dagegen (mittlere Dichte gerechnet) nur etwa 0.8mal so groß*), d. h. also, daß die *Stärke der Ionisation bzw. der Ladungstrennung infolge der Wirkung des abnorm hohen Drucks sich für Erde und Sonne als ziemlich gleich ergibt.* Nach dem, was wir von dem Verhalten der Materie unter den der experimentellen Forschung zugänglichen Bedingungen wissen, ist dieses Ergebnis nicht überraschend.

4. *Beziehung zu luftelektrischen Erscheinungen.* Eine wichtige und interessante Frage ist, ob die im vorhergehenden entwickelte *physikalische Theorie des Erdmagnetismus* in einer *Beziehung* steht zu der wichtigsten Aufgabe der luftelektrischen Forschung, nämlich *der Frage nach der Aufrechterhaltung des elektrischen Erdfeldes.*

Das *luftelektrische Grundproblem* ist kurz folgendes: Der elektrisch leitende feste Körper ist umgeben von einer schlecht leitenden Lufthülle, welche in größerer Höhe in eine äußere atmosphärische Hülle, bestehend aus sehr gut leitenden, verdünnten Gasen übergeht. Aus den an der Erdoberfläche ausgeführten luftelektrischen Messungen geht hervor, daß — analog wie bei einem Kugelkondensator — die äußere leitende Hülle ein positives, der feste Erdkörper ein negatives elektrisches Feld besitzt, woraus sich ein vertikaler nach abwärts gerichteter Leitungsstrom in der nur wenig leitenden Luft ergibt, welcher der Erde fortdauernd positive Ladung zuführt. Die Stärke des Gesamtstromes, welcher der Erde zufließt,

*) Ausgehend von der Hypothese, daß der Erd- und Sonnenmagnetismus durch eine Ladungstrennung in Form einer positiven Raumladung und einer gleich großen negativen Oberflächenladung verursacht wird, kommt Angenheister (Göttinger Nachrichten 1924, S. 229ff.) zu der Feststellung, daß die Raumladungen der Masseneinheit für die Sonne und Erde einander gleich sein müßten, ein Ergebnis, welches dem obigen Resultat ähnlich ist:

beträgt rund 1400 Amp. Die noch ungelöste Frage ist nun: *Welches ist die Ursache, daß dieser stationäre Zustand aufrechterhalten wird?*

Der abgeleiteten Theorie der Ladungstrennung im Erdkörper entspricht folgendes Schema der Verteilung der elektrischen Ladungen (Fig. 2): Die Kugel *A* bedeutet den positiv geladenen Erdkern, der umgeben wird von der negativ geladenen Kugelschale *B*. Diese ist wiederum von einer Kugelschale *C* von geringer Mächtigkeit umgeben, welche aus der schlecht leitenden Luft besteht. Außerhalb von *C* befindet sich die aus sehr gut leitenden, verdünnten Gasen bestehende Hülle *D*. Die Grenzflächen zwischen den Kugelschalen *B* und *C*, d. i. die Erdoberfläche, ist der Ort der luftelektrischen Messungen. Ob der Übergang zwischen

den einzelnen Zonen plötzlich oder allmählich ist und wie mächtig die einzelnen Schalen sind, ist für die vorliegende Frage belanglos.

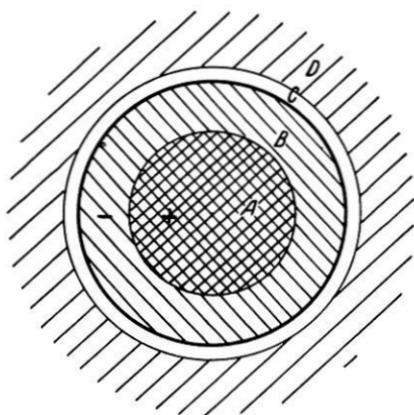


Fig. 2. Schema der Ladungsverteilung im Erdkörper

Die Materie des Erdkerns *A* wird infolge des großen Drucks und der hohen Temperatur stark ionisiert, und ein Teil der freien Elektronen geht infolge der Druckwirkung über in den äußeren Teil *B* der Erdmasse, der weniger stark ionisiert und einem geringen Druck ausgesetzt ist. Die Ausbreitung der freien Elektronen in der Zone *B* hält naturgemäß nicht an der Erdoberfläche an, sondern setzt sich infolge der gegenseitigen Abstoßung der negativen Ladungseinheiten durch die schlecht leitende Luftschicht *C* fort bis

in die äußere Hülle *D* von guter Leitfähigkeit. Die unmittelbare Folge ist eine vertikale Potentialabnahme in der Lufthülle, wobei die Erdoberfläche als negativ, die höheren Schichten der Atmosphäre als positiv geladen erscheinen. Die Elektronen, welche die schlecht leitende Luftschicht *C* durchdringen und sich in der äußeren gut leitenden Hülle *D* ausbreiten, werden naturgemäß weiter in den Weltraum abgeleitet. Um den elektrischen Gleichgewichtszustand aufrechtzuerhalten, muß infolgedessen ein Nachströmen freier Elektronen vom Erdkern *A* durch Mantel *B* und Lufthülle *C* in die leitende Hülle *D* erfolgen, was einem stationären Transport negativer Elektrizität von unten nach oben entspricht.

Gegen diese sich aus der entwickelten physikalischen Theorie des Erdmagnetismus ergebende Erklärung der Aufrechterhaltung der negativen Erdladung erheben sich sofort zwei Einwände: 1. Wie steht quantitativ die luftelektrisch gemessene Stärke des Vertikalstromes mit den erdmagnetisch sich aus der Theorie ergebenden Ladungsmengen in Einklang? 2. Wie ist die Dauer des stationären Zustandes zu erklären, da ein solcher Prozeß doch nicht ununterbrochen sich fortsetzen kann?

Nach S. 121 ist die Zahl N_1 der im ionisierten Erdkern A vorhandenen freien Elektronen von der Größenordnung:

$$N_1 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \cdot 10^{24} = 1.8 \cdot 10^{50}.$$

Von diesen breitet sich nach S. 120, Gleichung (6d), ein kleiner Teil:

$$N_2 = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_0^3) \beta_4 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \alpha_4 = 10^{33},$$

infolge der Druckwirkung in den den Erdkern umgebenden Schichten aus.

Durch den luftelektrischen Vertikalstrom werden $1400 \text{ Amp.} = \frac{1400}{10 \cdot 1.591 \cdot 10^{-20}}$
 $= 8.8 \cdot 10^{21}$ Elektronen in der Sekunde durch die Lufthülle C in die leitfähige äußere atmosphärische Hülle D bzw. den Weltraum abgeleitet.

In einem Zeitraum von einer Million Jahren würde also, wenn der beobachtete luftelektrische Vertikalstrom während dieser Zeit ununterbrochen fließen und die abfließende negative Elektrizität von dem Erdkern nachströmen würde, diesem

$$N_3 = 10^6 \cdot 865 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 8.8 \cdot 10^{21} = 2.8 \cdot 10^{35}$$

Elektronen entzogen. Der Gehalt des Erdkerns an freien Elektronen würde sich in einem solchen Zeitraum also nur um den winzigen prozentualen Betrag von rund $N_3 : N_1 = 1 : 10^{15}$ vermindern.

Das zahlenmäßige Ergebnis dieser Überschlagsrechnung läßt also erkennen, daß *die luftelektrisch gemessene Stärke des stationären Vertikalstromes quantitativ vollkommen durch die abgeleitete Theorie erklärt* werden kann und eine merkbare Änderung in der Verteilung der Ladungsmengen im gesamten Erdkörper auch in erdgeschichtlich großen Zeiträumen nicht verursachen kann. Betrachten wir unbegrenzte Zeiträume der Entwicklung der Erde, so muß freilich gefolgert werden, daß *der luftelektrische Vertikalstrom mit der Zeit kleiner und kleiner werden* und schließlich ganz aufhören muß.

Betrachten wir zusammenfassend das Ergebnis der Erörterung der entwickelten Theorie, so ist festzustellen, daß sie physikalisch durch folgende Tatsachen gestützt wird:

1. Sie wird aus der Atomphysik abgeleitet.
2. Sie erklärt das Vorhandensein des Erd- und Sonnenmagnetismus.
3. Sie gibt darüber hinaus eine befriedigende Erklärung für die Ursache des luftelektrischen Vertikalstromes.