

Über eine neue Deutungsmöglichkeit von Terrella-Experimenten

Von HORST HÄNSEL, *Institut für Physik Potsdam, DDR*

(Manuscript received December 9, 1963; revised version October 20, 1964)

ABSTRACT

Terrella experiments performed in a self-sustained glow discharge are described. A new theory to explain these experiments is given. The theory strictly explains all results of our experiments and of the experiments performed by Birkeland, Malmfors and Block. The special system of electrodes only gives the "auroral zones". Terrella experiments in a self-sustained glow discharge are not concerned with the phenomena in the nature.

Einführung

Der Gedanke, durch Analogieexperimente Aufschluß über die Natur und das Wesen geophysikalischer Erscheinungen zu bekommen, geht auf BIRKELAND (1901, 1908, 1913) zurück. Er brachte eine kleine Kugel (Durchmesser $2 r_T \approx 25$ cm) als Erdmodell (Terrella von ihm genannt, eine Bezeichnung, der wir uns im folgenden anschließen wollen) in ein großes Vakuumgefäß (Inhalt ca. 1 m^3), ahmte das Magnetfeld der Erde durch eine Spule im Innern der Terrella nach und zündete zwischen Terrella als Anode und einer weiteren Elektrode als Kathode eine Gasentladung. Die entstehenden Leuchterscheinungen (vgl. Abb. 1) wurden von ihm als geophysikalisches Analogieexperiment für die Nordlichterscheinungen angesehen. MALMFORS (1946) und BLOCK (1955, 1956, 1958) führten ähnliche Versuche zwecks experimenteller Bestätigung der ALFVÉNSCHEN Theorie (1939–1958) der magnetischen Stürme und Nordlichterscheinungen durch. Der Aufbau, die Durchführung und Deutung genannter Versuche ist unseres Erachtens teilweise so problematisch (z. B. Drucktransformation, Größe des Magnetfeldes der Terrella, Deutung der entstehenden Leuchterscheinungen), daß uns weitere derartige Experimente zur Aufklärung genannter Probleme notwendig erschienen.

Versuchsapparatur

Als Vakuumgefäß dient eine Rezipientenglocke (Durchmesser 55 cm, Höhe 76 cm). Ihr

Rauminhalt (ca. $0,2 \text{ m}^3$) ist somit wesentlich kleiner als der der von BIRKELAND (1 m^3) und BLOCK ($1,5 \text{ m}^3$) verwendeten Vakuumgefäße, reicht aber, wie die durchgeführten Versuche gezeigt haben, zur präzisen Untersuchung der interessierenden Erscheinungen vollkommen aus. Die Dichtung Rezipiententeller-Vakuumgefäß erfolgt mit einem ungefetteten Gummiring. Als Terrella fand eine nach dem Prinzip des Fluxballes (BROWN & SWEER, 1945) gewickelte Kugelspule Verwendung. Es konnte von uns gezeigt werden (HÄNSEL 1965), daß, wenn die Spule in zylindrischen Lagen $q_N = 2\sqrt{Nr_T r_D}$ (q_N Abstand der N -ten Lage von der Spulenchse, N die N -te Wicklungslage, r_T Terrellahalbmesser, r_D Drahradius) der Länge $2|z_{Ng}| = +2\sqrt{r_T^2 - 4r_D r_T}$ mit der konstanten Windungsdichte $n(z) = 1/2r_D$ in Richtung der Spulen (z)-Achse gewickelt wird und ihre maximale Lagenzahl $N_{\max} = r_T/4r_D$ beträgt, sich ihr magnetisches Moment zu

$$M = \frac{\mu I r_T^4}{60 r_D^2}$$

(I Stromstärke, μ Permeabilität) berechnet. Die Daten der verwendeten Terrella betragen: $2 r_T = 89,5$ mm, $r_D = 0,42$ mm, $N_{\max} = 25$, $R \approx 10 \Omega$, $M/I = 3,79 \cdot 10^3$ [Gauß $\text{cm}^3 \text{ A}^{-1}$]. Die Spule wurde in Epoxydharz eingegossen und in zwei Aluminiumhalbkugelschalen eingeschlossen. Die Berührungslinie dieser Schalen ist mit dem magnetischen Äquator der Spule identisch. Die Übereinstimmung des Feldes der Kugelspule mit einem Dipolfeld kann als sehr gut

angesehen werden. Die Lagerung der Terrella im Entladungsgefäß erfolgt mit einer auf einem PVC-Stab befestigten Kugelpfanne. Hierdurch kann eine beliebige Orientierung der Dipolachse in bezug auf das Elektrodensystem vorgenommen werden. Durch Verbindung der Terrella-hülle mit einem Pol der in ihr befindlichen Kugelspule ist sie zugleich ein Zuleitungskontakt für den Spulenstrom. Sehr nachteilig wirkt sich auf die Versuche die große Leistungsaufnahme der Terrella (bis zu 7 kW) aus. Sie führt zu einem sehr raschen Erhitzen der Terrella und kann so leicht zu ihrer Zerstörung führen. Die Durchführung der Versuche mußte deswegen auf wenige Sekunden beschränkt werden. Alle verwendeten Elektrodensysteme wurden ebenfalls aus Aluminium gefertigt. Der Druck im Entladungsgefäß wurde so gewählt, daß sich eine selbständige Entladung ausbilden kann und die Terrella bei abgeschaltetem Spulenstrom vollkommen vom Entladungsplasma umgeben wird. Alle angegebenen Versuchsergebnisse beziehen sich daher ausschließlich auf Erscheinungen in der selbständigen Entladung. Im Gegensatz zu BLOCK (1955) werden Terrellaexperimente in unselbständigen Entladungen nicht betrachtet.

Durchgeführte Experimente

a) Leuchterscheinungen bei variablem Abstand Kathode-Terrella

Das verwendete Elektrodensystem im Schnitt zeigt Abbildung 2, die gewonnenen Ergebnisse in Abhängigkeit vom Abstand d der Kathode von der Terrella Abbildung 3. Die abgebildeten Erscheinungen liegen hier und wenn nicht ausdrücklich anders bemerkt, auch bei den nachfolgenden Aufnahmen in der Zeichenebene von Abbildung 2. Alle interessierenden Größen sind aus den Abbildungsunterschriften zu entnehmen. Die angegebene Spannung ist hier und in allen folgenden Aufnahmen auf den Potentialwert $U_T = 0$ der Terrella bezogen. Weiter bedeuten α den Winkel der Entladungsansatzpunkte an der Terrella, I die Entladungsstromstärke und B_p die magnetische Induktion an den Polen der Terrella. Man erkennt, wie sich mit abnehmendem d die inneren Entladungsansatzpunkte nach niederen magnetischen Breiten verschieben, während die äußeren kaum eine

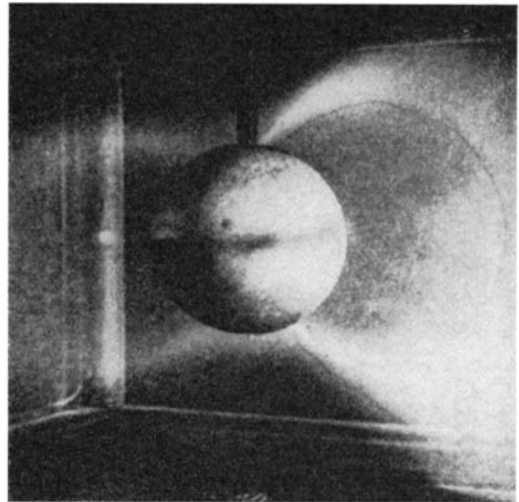


ABB. 1

Veränderung erfahren. Überstreicht α in Abbildung 3a einen Bereich von 10° , so sind es in Abbildung 3d schon 25° .

b) Veränderungen der Leuchterscheinungen bei Drehung der Terrella im konstant gehaltenen elektrischen Feld

Das verwendete Elektrodensystem zeigt im Schnitt Abbildung 4, Abbildung 5 die gewonnenen Ergebnisse in Abhängigkeit des Winkels β . β bedeutet hierbei den Drehungswinkel der Terrella um eine Achse durch den Terrellamittelpunkt senkrecht zur Papierebene. Man erkennt, wie mit wachsendem β die rechte Leuchterscheinung an der Terrella immer mehr verschwindet, während sich der Ansatzpunkt der linken von $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ für $\beta = 0$ in den Bereich $\alpha \approx 90^\circ$ für $\beta = 90^\circ$ verschiebt.

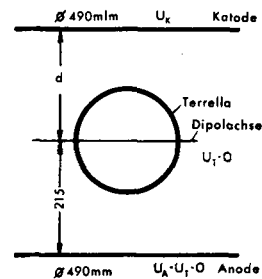
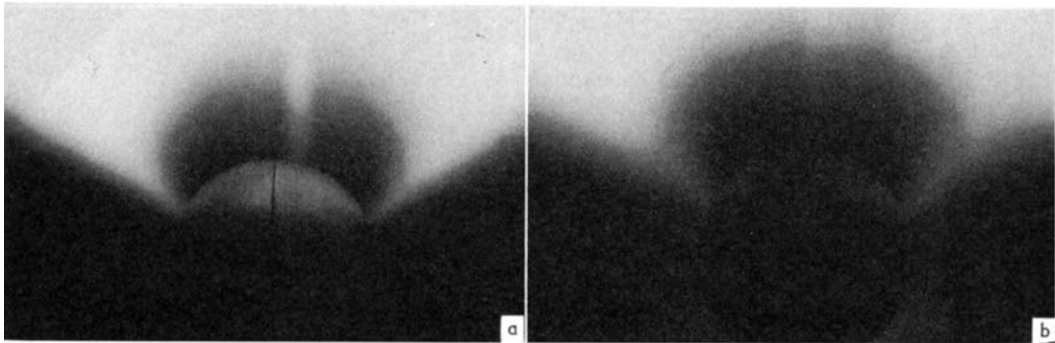
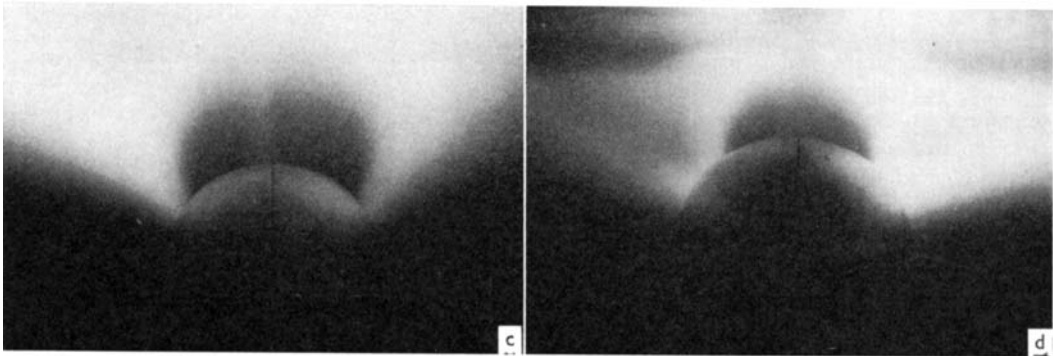


ABB. 2. Elektrodensystem (im Schnitt) für die in Abb. 3 dargestellten Leuchterscheinungen.



$d = 280 \text{ mm}$
Entladungsansatzpunkte
 $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$

$d = 180 \text{ mm}$
Entladungsansatzpunkte
 $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$



$d = 130 \text{ mm}$
Entladungsansatzpunkte
 $55^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$

$d = 85 \text{ mm}$
Entladungsansatzpunkte
 $40^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$

ABB. 3. Leuchterscheinungen in Abhängigkeit vom Abstand d der Kathode von der Terrella ($U_K = -800 \text{ V}$, $B_p = 1650 \text{ Gauß}$, $I \approx 10 \text{ mA}$).

c) *Veränderung der Leuchterscheinungen bei einer festen Kathode und einer zweiten halbkugelförmigen mit variablem Abstand von der ersten*

Abbildung 6 zeigt das verwendete Elektrodensystem im Schnitt, die Abbildungen 7a bis 7c die gewonnenen experimentellen Ergebnisse in Abhängigkeit von d . Wie man erkennt, zerspaltet sich ab einer bestimmten Entfernung d der halbkugelförmigen Elektrode von der Terrella die Leuchterscheinung in zwei.

d) *Leuchterscheinungen bei den verschiedenartigsten Elektrodensystemen*

Die Abbildungen 8a bis 8i zeigen einige von uns durch speziell gewählte Elektrodensysteme erhaltene Leuchterscheinungen. Der Druck im Entladungsgefäß wurde für alle diese Experimente genau wie bei den vorhergehenden so

gewählt, daß bei nicht vorhandenem Magnetfeld die Terrella ganz im Gebiet des nach außen vollkommen homogenen Entladungsplasmas liegt. Die Kathodenspannung U_K betrug -800 V bis -1500 V , die magnetische Induktion an den

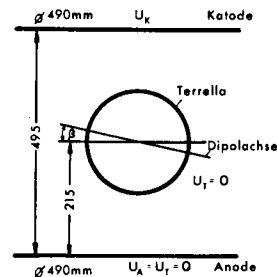
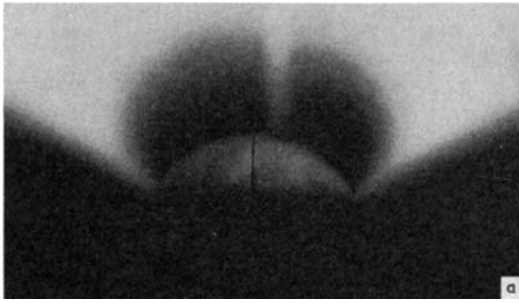
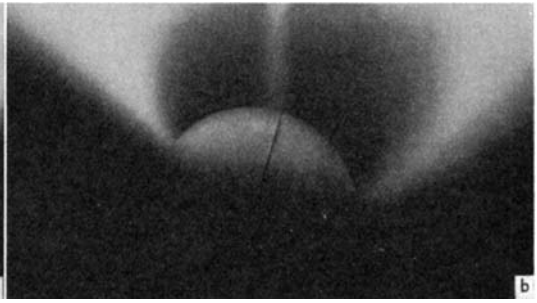


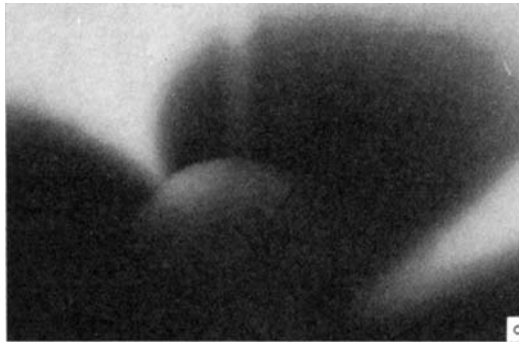
ABB. 4. Elektrodensystem (im Schnitt) für die in Abb. 5 dargestellten Leuchterscheinungen.



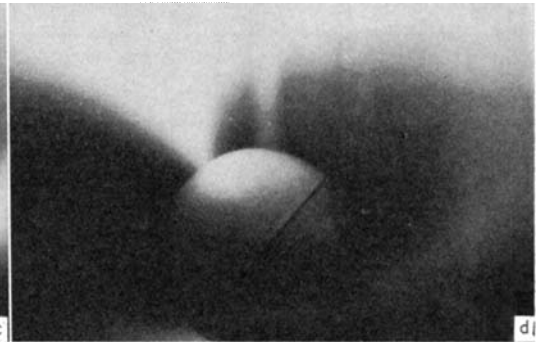
$\beta = 0^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$



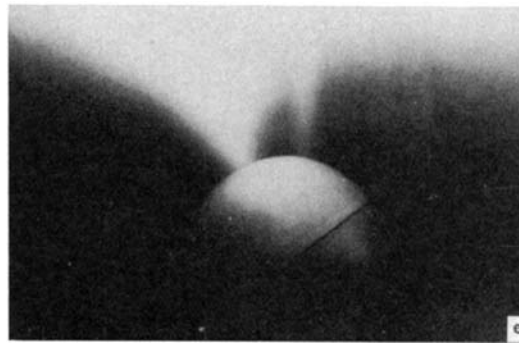
$\beta = 18^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $65^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$



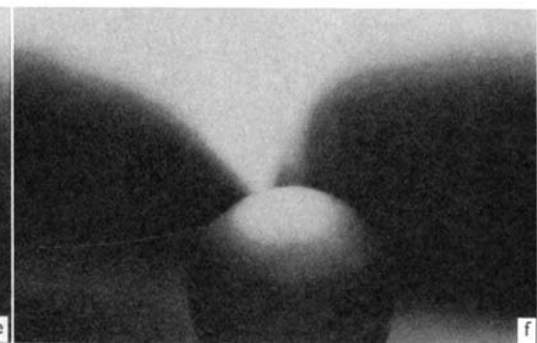
$\beta = 36^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$



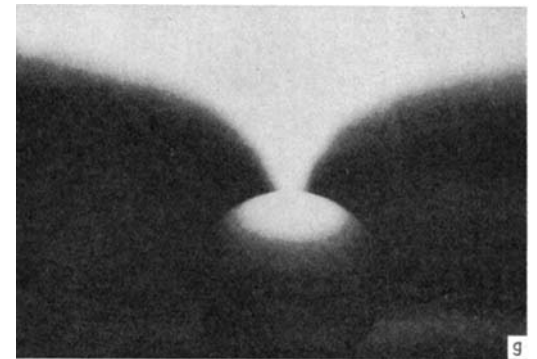
$\beta = 45^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $70^\circ \leq \alpha \leq 78^\circ$



$\beta = 54^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $75^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$



$\beta = 69^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $78^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ$



$\beta = 90^\circ$
Entladungsansatzpunkte
 $85^\circ \leq \alpha \leq 95^\circ$

ABB. 5. Leuchterscheinungen in Nähe der Terrella. Terrella ist gegenüber Abb. 3 um den Winkel β (Drehachse senkrecht zur Papierebene) gedreht. ($U_K = -800$ V, $B_p = 1605$ Gauß, $I \approx 10$ mA.)

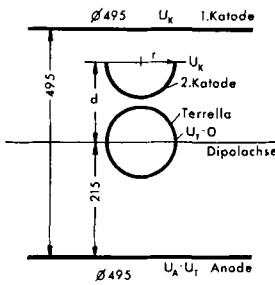


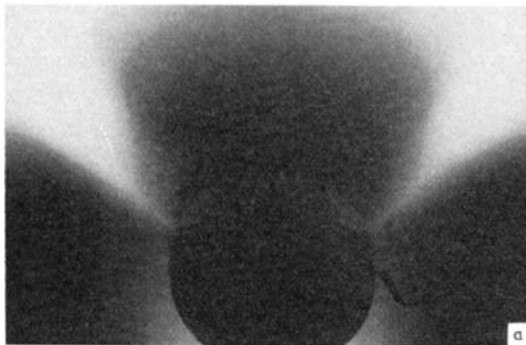
ABB. 6. Elektrodensystem (im Schnitt) für die in Abb. 7 dargestellten Leuchterscheinungen.

Polen der Terrella 1600 bis 2000 Gauß. Die Leuchterscheinungen besitzen, je nachdem welche Elektrodenanordnung und -form gewählt wird, einen (vgl. Abb. 8a), zwei (vgl. 8b und 8c), drei (vgl. Abb. 8d und 8e), fünf (vgl. Abb. 8f), sechs (vgl. Abb. 8g) oder sogar zehn Ansatzpunkte (vgl. Abb. 8h) an der Terrella oder verschwinden in der Papierebene gänzlich und bilden stattdessen einen leuchtenden Ring in der Äquatorebene der Terrella (vgl. Abb. 8i), zeigen einen symmetrischen (vgl. Abb. 8b, 8c, 8d und 8h) oder unsymmetrischen Verlauf (vgl. Abb. 8a, 8e, 8f und 8g).

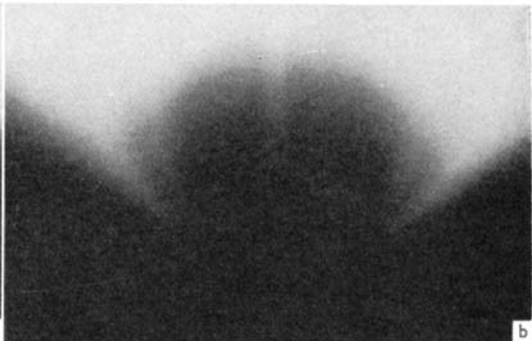
Deutung der Experimente

Vorstehende experimentelle Untersuchungen (vgl. Abb. 5, Abb. 7 und Abb. 8) zeigen deutlich, daß außer dem magnetischen Feld auch das elektrische entscheidend die Form der Leuchterscheinungen beeinflusst. Diese Tatsache fand weder in den Arbeiten von BIRKELAND noch in denen von MALMFORS Beachtung. BLOCK (1958) betrachtete lediglich für die unselbständige Entladung den Einfluß der Potentialverteilung in der magnetischen Äquatorialebene der Terrella auf die Form der Leuchterscheinungen. Für die selbständige Entladung fehlen z. Z. derartige Messungen.

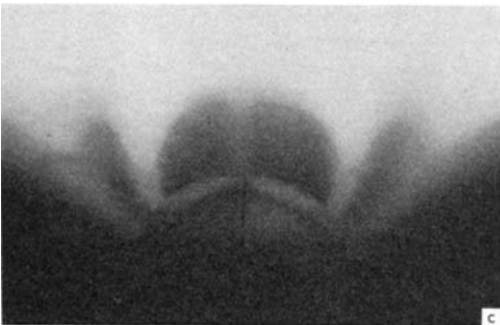
Abbildung 9 zeigt das zu Abbildung 3a zugehörige elektrische und magnetische Feldlinienbild. Abbildung 9 stellt hierbei die Ebene dar, die die Elektroden senkrecht schneidet und sowohl Terrellamittelpunkt als auch den Vektor ihres magnetischen Dipolmomentes enthält. Das zu Abbildung 9 zugehörige elektrische Äquipotentiallinienbild wurde experimentell im elektrolitischen Trog gewonnen. Die Abmessungen des Troges betragen 160×80 cm. Es war daher möglich, die zu messende Anordnung im Maß-



$d = 270$ mm



$d = 200$ mm



$d = 160$ mm

ABB. 7. Veränderung der Leuchterscheinungen bei einer festen Kathode und einer zweiten halbkugelförmigen mit variablem Abstand d von der Dipolachse ($U_K = -800$ V, $B_p = 1605$ Gauß).

stab 1:1 nachzubilden und so eine hohe Meßgenauigkeit zu erreichen. Durch Konstruktion der orthogonalen Trajektorien zum Potentiallinienbild erhielt man dann sofort den Verlauf der elektrischen Feldstärke.

Wir nehmen an, irgendwo im Entladungsraum zwischen Kathode und Terrella entstehe ein Elektron und bewege sich längs einer elektrischen Feldlinie. Überlagert man jetzt ein magnetisches Feld, so behindert dies die Bewegung, und zwar lenkt es das Elektron auf Grund der LORENTZKRAFT senkrecht zur ursprünglichen Bewegungsrichtung ab. Maßgebend für die Größe dieser Ablenkung ist außer der Stärke des magnetischen Feldes nur die Geschwindigkeitskomponente des Elektrons senkrecht zum magnetischen Feld, also in Näherung der Sinus des Winkels zwischen elektrischen und magnetischen Feldlinien. In Abbildung 9 erkennt man nun ein Gebiet, in welchem elektrische und magnetische Feldlinien über einen gewissen Bereich parallel verlaufen. (Verfolgt man z. B. in Abbildung 9 die elektrische Feldlinie, die bei ca. 65° nördlicher Breite auf der Kugel beginnend zur Kathode geht, so sieht man, daß ihr auf über $\frac{2}{3}$ ihrer Gesamtlänge eine magnetische Kraftlinie parallel verläuft.) In diesem Bereich ist somit die Behinderung der Entladung durch das überlagerte magnetische Feld am geringsten. Weiter muß hierbei beachtet werden, daß der Betrag der magnetischen Feldstärke mit der dritten Potenz der Entfernung vom Dipol abnimmt, die behindernde Wirkung gerade in Nähe der Terrella am größten ist. Wir müssen deshalb folgern, daß bei Zuschalten des Magnetfeldes die Entladung sich auf jene Bereiche des Entladungsraumes konzentriert, in denen der Verlauf des elektrischen und magnetischen Feldes am weitgehendsten übereinstimmt. Dies ist aber das oben schon genannte Gebiet zwischen 60° und 70° magnetischer Breite, das auf Grund der gewählten Elektrodenanordnung rein zufällig mit der natürlichen Polarlichtzone übereinstimmt. Das Experiment (vgl. Abb. 3) bestätigt vollkommen diese Aussage. Abbildung 10 zeigt uns die Begrenzung der Leuchterscheinungen von Abbildung 3a mit zugehörigem Feldlinienbild. Man erkennt, daß das Gebiet der Leuchterscheinungen mit dem Parallelitätsbereich von elektrischem und magnetischem Feldlinienbild identisch ist.

Eine Verkleinerung von d bedingt — wie man

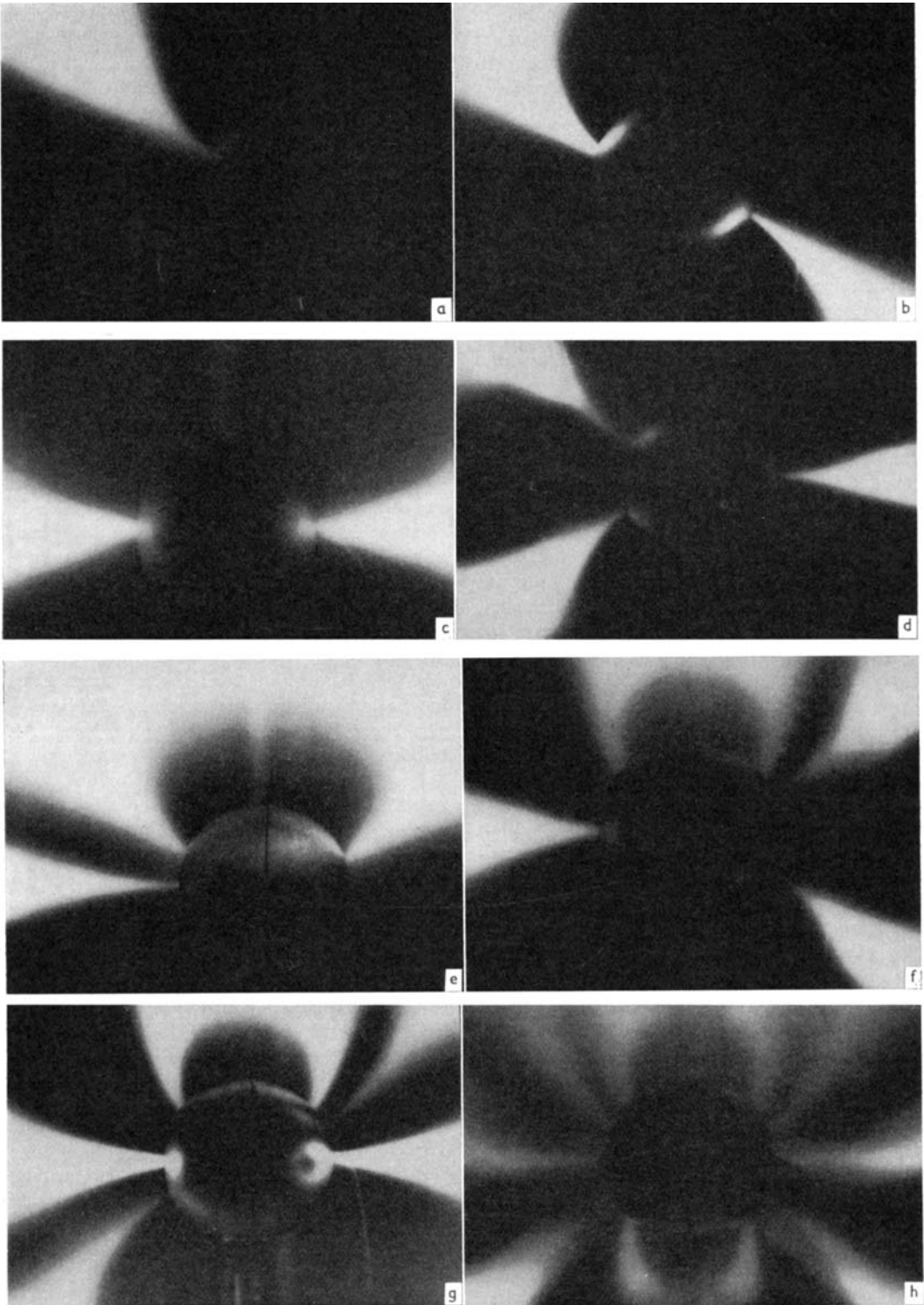
sich leicht überzeugt — eine Vergrößerung des Parallelitätsbereiches von E und B. Allerdings wird diese erst dann merklich, wenn d in die Größenordnung von $2 r_T$ kommt. Auch diese Tatsache wird vom Experiment vollauf bestätigt (vgl. Abb. 3a bis Abb. 3d). Vorliegende Betrachtungen zeigen auch, warum BIRKELAND, MALMFORS und BLOCK in ihren Experimenten Leuchterscheinungen bekamen, die in ihren Ansatzpunkten auf der Terrella mit der Polarlichtzone identisch waren. Genannte Autoren verwendeten nämlich ausschließlich Elektrodensysteme, bei denen der Abstand Kathode-Terrellamittelpunkt groß gegenüber dem Terrelladurchmesser war. Diese Elektrodenanordnung führt aber rein zufällig zu einem solchen elektrischen Feldverlauf, der das erwartete Ergebnis liefert.

Denkt man sich die Terrella entsprechend dem in Abbildung 5 dargestellten Experiment um den Winkel β gedreht, so verändert sich das elektrische Feld nicht, wohl aber die gegenseitige Neigung von elektrischem und magnetischem Feldlinienbild. Man erkennt aus Abbildung 9 sehr leicht, daß in vollkommener Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen der Abbildung 5 für wachsendes β der Bereich angenäherter Übereinstimmung von magnetischem und elektrischem Feldverlauf sich zum Wert $\alpha = 90^\circ$ verschieben muß. Abbildung 11 zeigt dies für $\beta = 54^\circ$ sehr deutlich.

Bewegt man entsprechend Abbildung 7 die zweite Kathode in Richtung auf die Terrella, so muß ab einem bestimmten Abstand betrachteter Parallelitätsbereich von E und B in zwei zerfallen und somit auch die Leuchterscheinungen. Die in Abbildung 7 dargestellten Leuchterscheinungen bestätigen dies vollauf.

Wählt man solche Potentialverhältnisse, daß in Terrellanähe kein Bereich angenäherter Übereinstimmung von elektrischem und magnetischem Feldlinienverlauf vorhanden ist, so läßt sich erreichen, daß die Leuchterscheinung die Terrella als Ring in der magnetischen Äquatorialebene umgibt (vgl. Abb. 8h). Durch entsprechende andere Elektrodenformen bekommt man die übrigen Ergebnisse in Abbildung 8.

Auch die berühmten BIRKELANDSchen Versuche (vgl. Abb. 1) sind sofort mit der von uns vertretenen Auffassung erklärbar. Durch die größere Terrella ($r_T = 24$ cm) BIRKELANDS verschiebt sich bei seiner Versuchsanordnung der Parallelitätsbereich von E und B zu Werten



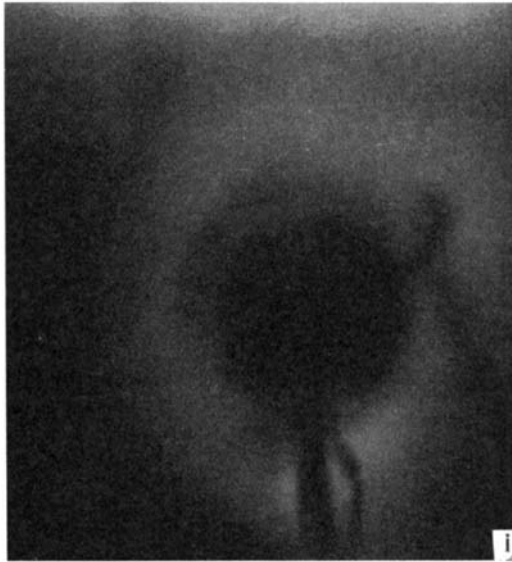


ABB. 8. Leuchterscheinungen in Nähe der Terrella bei speziell gewählten Elektrodensystemen.

$\alpha > 70^\circ$, wie es auch das in Abbildung 1 wieder-
gegebene experimentelle Ergebnis zeigt.

Weiter erklären sich die von BLOCK nach
seiner Erklärung der Versuche nicht deutbaren
bzw. nicht diskutierten Erscheinungen der
selbständigen Entladung nach unserer Auffas-
sung zwanglos:

a) Eine in die magnetische Äquatorebene
gebrachte dielektrische Platte verändert den
Feldstärkenverlauf in dem zur Diskussion ste-
henden Gebiet nicht, kann daher — was auch
der entsprechende Versuch von BLOCK bestä-
tigt — keinen Einfluß auf Lage und Gestalt der
Leuchterscheinungen haben. Überzieht man da-

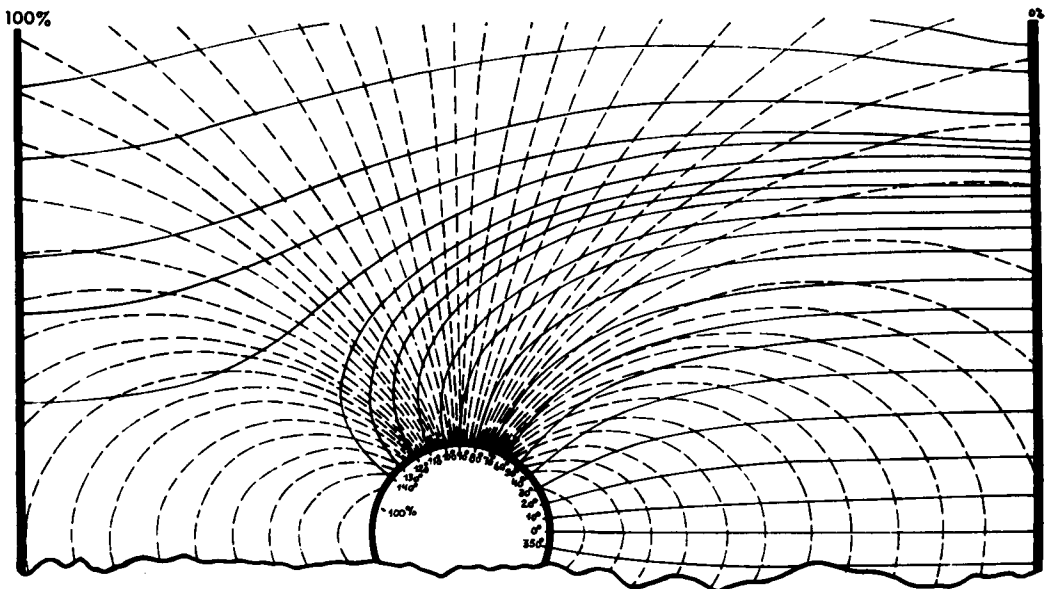


ABB. 9. Magnetische (-----) und elektrische (——) Feldlinien zu den in Abb. 3a dargestellten
Leuchterscheinungen.

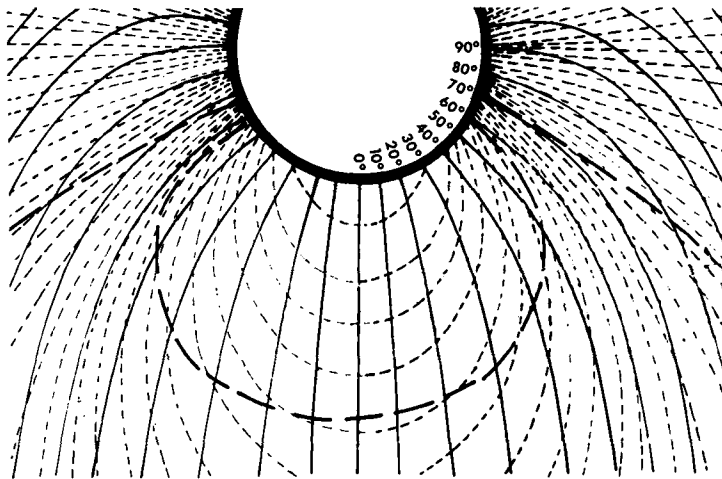


ABB. 10. Begrenzung der Leuchterscheinungen (---) von Abb. 3a mit zugehörigem elektrischen (—) und magnetischen (····) Feldlinienverlauf.

gegen diese Platte mit einer Kupferschicht und gibt dieser ein bestimmtes Potential, so verschieben sich der Parallelitätsbereich von \mathbf{E} und \mathbf{B} und somit in vollkommener Übereinstimmung mit dem Experiment die Leuchterscheinungen.

b) Die Zeichenebene der Abbildung 9 ist die einzige Ebene, in der elektrische und magnetische Feldstärke über längere Strecken Parallelitätsbereiche besitzen können. Die Leuchterscheinungen können also nur in dieser Ebene an der Terrella ansetzen. Auch dies wird von allen Experimenten vollauf bestätigt.

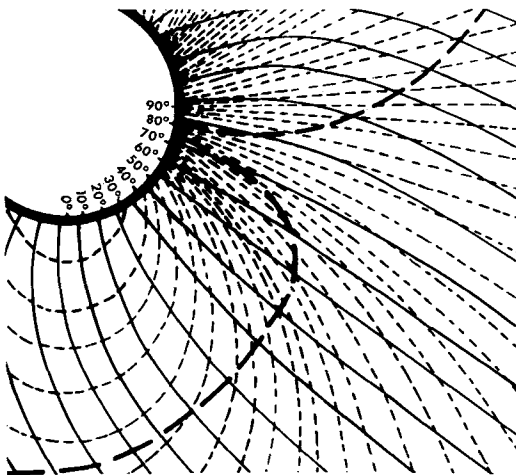


ABB. 11. Begrenzung der Leuchterscheinungen (---) von Abb. 5e mit zugehörigem elektrischen (—) und magnetischen (····) Feldlinienverlauf.

c) Die Ausbildung der Leuchterscheinungen ist bei konstanter elektrischer Feldstärke abhängig von der Stärke des Magnetfeldes. Bilden sich oberhalb einer bestimmten magnetischen Grenzfeldstärke die ersten Leuchterscheinungen aus, so muß entsprechend der Abnahme des magnetischen Dipolfeldes mit der dritten Potenz der Entfernung von der Terrella dieser Prozeß in unmittelbarer Nähe der Terrella beginnen. Für wachsendes \mathbf{B} müssen sich diese Leuchterscheinungen dann in immer weitere Entfernung von der Terrella erstrecken. Haben sie sich voll ausgebildet, so kann eine weitere Steigerung des magnetischen Feldes keinen nennenswerten Einfluß mehr haben, weil doch im Gebiet der Parallelität zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke ein Wachsen des Magnetfeldes nur wenig Einfluß besitzt. Alle genannten Effekte werden beobachtet.

d) Da unsere Deutung vorstehender Versuche mit dem physikalischen Prozeß der Nordlichterscheinungen in keinem wirklichen Zusammenhang steht, braucht die magnetische Feldstärke an den Polen der Terrella zur Ausbildung der Leuchterscheinungen nicht den z. B. von BLOCK aus Ähnlichkeitsbetrachtungen gefolgerten enorm hohen Wert von 60 Millionen Gauß zu besitzen. Auch dieser bisher nicht deutbare Widerspruch zwischen Theorie und Experiment ist somit geklärt. Entsprechende Überlegungen gelten für die Drucktransformation.

Schlußfolgerungen

Die von uns vertretene Deutung über das Zustandekommen der Leuchterscheinungen bei Terrellaexperimenten erklärt zwanglos sowohl alle unsere experimentellen Ergebnisse als auch die von BIRKELAND, MALMFORS und BLOCK. Die Versuche von BIRKELAND, MALMFORS und BLOCK in der selbständigen Entladung führen nur auf Grund des gewählten Elektroden-systems zufällig zu Ansatzpunkten der Leuchterscheinungen an der Terrella, die mit den Polarlichtzonen übereinstimmen. Die Versuche können daher nicht als geophysikalische Analogieexperimente zu den magnetischen Stürmen und Nordlichterscheinungen im eigentlichen Sinne angesehen werden, denn es liegt nicht in seinen physikalischen Vorgängen, sondern nur in seinen äußeren Erscheinungsformen ein mit dem Naturvorgang übereinstimmendes Experiment vor.

Vorliegende Arbeit wurde auf Anregung des Geomagnetischen Instituts Potsdam der Deutschen Akademie der Wissenschaften durchge-

führt. Den Herren Professoren Dr. G. Fanselau und Dr. O. Lucke sei an dieser Stelle für ihr stets förderndes Interesse an dieser Arbeit und für wertvolle Hinweise gedankt. Der Aufbau der Versuchsanordnung lag in den Händen des Institutsmechanikers, Herrn Franke. Auch ihm sei an dieser Stelle für seine Unterstützung gedankt.

Zusammenfassung

Es werden die Ergebnisse von Terrellaexperimenten angegeben und eine Theorie zur Aufklärung dieser Versuche aufgestellt. Die angegebene Theorie erklärt zwanglos alle experimentellen Erscheinungen. Ebenfalls sind nach ihr sofort die Versuche von BIRKELAND, MALMFORS und BLOCK deutbar. Die mit Hilfe einer selbständigen Entladung durchgeführten Terrellaexperimente können nicht als geophysikalische Analogieexperimente im eigentlichen Sinne angesehen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- ALFVÉN, H., 1940, A theory of magnetic storms and aurorae, II, III. *Kungl. Sv. Vetenskapsakad. Handl.* (3), 18, No. 9.
- ALFVÉN, H., 1950, *Cosmical Electrodynamics*, Oxford.
- ALFVÉN, H., 1954, On the origin of cosmic radiation. *Tellus*, 6, S. 232.
- ALFVÉN, H., 1955, On the electric field theory of magnetic storms and aurorae. *Tellus*, 7, S. 50.
- ALFVÉN, H., 1956, The sun's general magnetic field. *Tellus*, 8, S. 1.
- ALFVÉN, H., 1958, On the theory of magnetic storms and aurorae. *Tellus*, 10, S. 104.
- BIRKELAND, K., 1901, Expédition Norvégienne de 1899-1900 pour l'étude des aurores boréales. *Videnskabs Selskabets Skrifter 1901. I. Mat.-naturv. Klasse No. 1.*
- BIRKELAND, K., 1908, *The Norwegian aurora polaris expedition 1902-03*, Vol. I, Oslo.
- BIRKELAND, K., 1913, *The Norwegian aurora polaris expedition 1902-03*, Vol. II, Oslo.
- BLOCK, L., 1955, Model experiments on aurorae and magnetic storms. *Tellus*, 7, S. 65.
- BLOCK, L., 1956, On the scale of auroral model experiments. *Tellus*, 8, S. 234.
- BLOCK, L., 1958, The present state of the electric field theory of magnetic storms and aurorae. *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*. Cambridge, S. 312.
- BLOCK, L., 1958, On the shape of auroral zones. *Ark. f. Fysik*, 14, S. 153.
- BROWN, W. und SWEER, J., 1945, The fluxball. *Rev. of Sc. Instr.* 16, No. 10, S. 276.
- HÄNSEL, H., 1965, Über das magnetische Moment einer Kugelspule. *Exp. Techn. d. Phys.*, Heft 1.
- MALMFORS, K. C., 1946, Experiments on the aurorae. *Ark. f. mat. astr. o. fysik*, 34B, No. 1.