ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 63.

1. *Messungen der Deformation des elektrostatischen Erdfeldes durch Luftfahrzeuge¹⁾;*

von Wilhelm Müller.

Inhaltsübersicht: I. Einleitung (Historisches und Ziel der Arbeit). — II. Apparatanordnung für Modellversuche und Methodik der Messungen. — III. Fehlerquellen der Apparatur und Methode. — IV. Ergebnisse. — V. Nachprüfung der Ergebnisse bei einer Freiballonfahrt. — VI. Bestimmung des Everlingschen Reduktionsfaktors. — VII. Kritik des Einkollektormeßverfahrens nach Everling. — VIII. Zusammenfassung.

I. Einleitung.

Historisches.

Die Ergebnisse der im vorigen Jahrhundert in Freiballonen oder mittels emporgelassener Drachen angestellten Messungen des luftelektrischen Potentialgefälles waren einer exakten Auswertung nicht zugänglich, da einmal die Deformation des Erdfeldes durch den leitenden Ballon nicht berücksichtigt wurde und dann der Einfluß der Eigenladung des Ballons, die dieser bei der Abfahrt vom Erdboden oder durch Ballastabgabe erhielt, die Messungen in quantitativ nicht zu kontrollierender Weise fälschte.

Letzterem Übelstande half F. Linke²⁾ dadurch ab, daß er an einer Stelle ständig einen schnellwirkenden Ausgleichskollektor arbeiten ließ, der nach einer Vertikalbewegung des Ballons sofort die möglicherweise mitgebrachte Eigenladung zerstreute und diesen selbst in elektrisches Gleichgewicht brachte mit einer zum Ballon relativ stets festliegenden Niveaufläche. Linkes Verdienst ist es also, daß er der Feld-

1) Auszug der Dissertation des Verfassers, Halle 1920.

2) F. Linke, Luftelektrische Messungen bei zwölf Ballonfahrten, Abhandl. d. Gött. Ges. d. Wiss., math.-phys. Kl. Neue Folge VII. 5. S. 22. 1904.

gestaltung um das Luftfahrzeug eine nur von der Anordnung des Ausgleichskollektors abhängige Deformation aufzwang. In dieser Weise hat Linke zuerst Absolutmessungen im Ballon mit zwei tief hinabgelassenen Meßkollektoren angestellt.

In welcher Weise stört nun eigentlich ein leitender Ballon von gegebener Gestalt und gegebenem Potential das Erdfeld? Da die rein mathematische Behandlung dieses Problems auf Grund der Potentialtheorie nur rohe Näherungswerte ergab, verwandten Ebert¹⁾, Lutz¹⁾ und Hoffmann²⁾ folgende Methode. Sie stellten ein getreues Modell des Luftfahrzeugs in einem künstlichen, elektrischen Felde isoliert auf und bestimmten den Niveauflächenverlauf um das Modell mittels Meßkollektors (Sonde).

Die theoretische Berechtigung dieser Reproduktion des Erdfeldes durch ein künstliches Feld gründet sich auf das von Maxwell³⁾ aufgestellte, bekannte Prinzip der elektrischen Ähnlichkeit. Dieses ermöglicht es uns, in rechnerisch einfacher Weise von den im künstlichen, elektrischen Felde gemessenen Größen auf die Verhältnisse in einem geometrisch ähnlichen System z. B. in dem Erdfeld zu schließen.

Nachdem in der geschilderten Weise die Unsicherheit der Messungen infolge Deformation des Erdfeldes und Eigenladung des Ballons behoben war, konnte das Potentialgefälle in seiner Abhängigkeit von der Höhe exakt bestimmt werden. Nach den bisher vorliegenden Messungen scheint es eine Exponentialfunktion der Höhe zu sein. Die meisten Beobachtungen des letzten Jahrzehnts erstreckten sich bis 3–5 km Höhe, selten bis 6 km (Gerdien). Um die Verhältnisse auch in den oberen Schichten der Troposphäre zu klären, die bekanntlich bis etwa 10 km hinaufreicht, unternahm im Herbst 1913 Everling⁴⁾ mit Wigand und Lutze zwei Hochfahrten, die in 8,5 bzw.

1) H. Ebert und W. Lutz, Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre. Bd. II. Heft 5. 1908.

2) K. Hoffmann, Experimentelle Prüfung der durch verschiedene Messungsanordnungen in einem elektrischen homogenen Felde hervorgerufenen Störungen der Niveauflächen. Dissertation. München 1911.

3) Cl. Maxwell, Treatise. Vol. I. § 94. 1873.

4) E. Everling, Messungen des elektrischen Spannungsgefälles in der freien Atmosphäre bis 9000 m Höhe. Verhandl. d. deutsch. Phys. Gesellsch. 16. S. 240. 1914.

9 km Höhe, also bis in die aerophysikalisch so interessante Substratosphäre führten und auch mit Leitfähigkeitsmessungen¹⁾ verbunden wurden. Im Gegensatz zu Linke, der zur Absolutmessung zwei tief herabgelassene Sonden benutzte, führte Everling²⁾ eine Relativmethode ein, bei der die Potentialdifferenz nur einer Sonde gegen den ausgeglichenen Ballon gemessen wird.

Ziel der Arbeit.

In erster Linie bestand nun der Zweck meiner Arbeit darin, die bei diesen Hochfahrten erhaltenen Ergebnisse auszuwerten, d. h. die beobachteten Meßwerte, die natürlich infolge der Deformation des Erdfeldes nur relativ sein können, im künstlichen Felde ihrem absoluten Betrage nach zu bestimmen. Dabei ergab sich eine entscheidende Kritik des Einkollektormeßverfahrens nach Everling.

Weiterhin wurde das künstliche Feld von mir zur Bestimmung der Störung des Erdfeldes durch eine Reihe anderer Luftfahrzeuge benutzt.

Diesen Deformationsmessungen an Luftfahrzeugen voraus ging eine Kontrolle der Apparatur und der Meßmethoden sowie eine Untersuchung der Fehlerquellen, wie sie für solche elektrostatischen Versuche charakteristisch sind.

II. Apparatanordnung für Modellversuche und Methodik der Messungen.

Im wesentlichen wurde für die Herstellung des künstlichen Feldes und den Aufbau der Abtastevorrichtung die von Hoffmann³⁾ benutzte, bewährte Apparatur als Vorbild genommen.

Das Feld wurde erzeugt zwischen 2 horizontalen Platten (3 m längs, 1,50 m quer) mit 2 m Vertikalabstand. Die untere, eine Zinkplatte, war durch starke Porzellanisolatoren mit darauf gelegten Paraffinplatten gegen Erde isoliert. Die obere Platte, ein Zinkdrahtnetz von 1 qcm Maschenweite, war mit

1) A. Wigand, Verhandl. d. Deutsch. Phys. Gesellsch. 16. S. 232. 1914.

2) E. Everling, a. a. O.

3) K. Hoffmann, a. a. O.

kräftigen Schnüren an der Zimmerdecke aufgehängt und gegen diese durch paraffinierte Ebonitstäbe isoliert. Durch diese Aufhängung wurde die von Hoffmann¹⁾ Seite 17 seiner Arbeit erwähnte Zusammendrängung der Niveauflächen in den Isolatoren vermieden, die bei isolierter Aufstellung der oberen Platte auf der unteren mittels Eckpfeilern nicht zu umgehen ist. Die Spannung zur Erzeugung des Feldes wurde von einer 100—160 zelligen Akkumulatorenbatterie geliefert.

Die *Abtastevorrichtung* bestand aus einem mit 105 cm langer, bis 175 cm ausziehbarer Sonde versehenen Tropfkollektor, dessen Aufladezeit etwa 30 Sekunden betrug, und einem Wulfschen 2 Fadenelektrometer der Firma Günther und Tegetmeyer. Ein solcher Kollektor hat nach Linke²⁾ als Referenzpunkt die Auflösungsstelle des Wasserstrahls, d. h. er zeigt das Potential dieser Stelle an. Kollektor und Elektrometer waren, durch Ebonit gegen ihre Unterlage isoliert, auf einem Schlitten angebracht, der eine Horizontal- und eine Vertikalbewegung über den gesamten Feldbereich ermöglichte. Die Fäden des Elektrometers wurden mit dem Kollektor, das Gehäuse mit der unteren Platte leitend verbunden.

Die *Modelle* wurden in das Feld meist in der von Hoffmann angegebenen Weise seitlich an einem horizontalen Halter eingeführt, der außerhalb des Feldes zwischen Paraffinplatten eingegossen war. Seltener wurden die Modelle mit paraffinierten Seidenfäden unter Zwischenschaltung von Bernsteinstücken an der oberen Platte aufgehängt.

Für die Aufladung der Modelle kommen 3 Methoden in Frage, die bei meinen Untersuchungen angewandt worden sind.

1. *Natürliche Ausgleichung.* Bringen wir ein leitendes Modell, z. B. das eines Ballons, isoliert in ein homogenes Feld, so wird es, wenn es eine Eigenladung mitbringt, zunächst eine Potentialdifferenz gegen seine Umgebung haben. Infolge der Leitfähigkeit der Luft wird sich diese Differenz nach einiger Zeit ausgleichen und das Modell ein mittleres Potential seiner nächsten Umgebung annehmen, das von der Gestalt und damit von der Kapazitätsverteilung des Ballons abhängt.

1) K. Hoffmann, a. a. O.

2) F. Linke, Über Messungen von Potentialdifferenzen mittels Kollektoren. Phys. Zeitschr. 4. S. 661. 1903.

Ein ungeladenes Modell nimmt dieses Potential sofort an.

2. *Aufladung von außen her.* Das Modell wird durch einen leitenden Halter mit dem Pol einer konstanten Spannungsquelle verbunden und so auf ein bestimmtes Potential gebracht. Da dieses auch einer gewissen Horizontalebene des ungestörten Feldes zukommt, so kann man die Fiktion machen, das Modell sei isoliert aufgehängt und durch irgendwie am Modell angebrachte Ausgleicher auf das Potential der angeführten Horizontalebene aufgeladen.

3. *Aufladung mittels Linkeschen Ausgleichskollektors.* Den Zweck und die Wirkungsweise des Linkeschen Ausgleichers haben wir bereits in der Einleitung behandelt. Wir wollen hier untersuchen, welche Kollektoren als Modellausgleicher im künstlichen Felde in Frage kommen. Von vornherein scheidet der Flammenkollektor aus, da die aufsteigenden Flammengase das Feld stark stören würden. Ebenso sehen wir von der Verwendung von Radiumkollektoren wegen der Ionisation¹⁾ ihrer Umgebung ab. Diese macht einmal eine genaue Bestimmung der Lage des Referenzpunktes infolge des Einflusses der Luftbewegung²⁾ sehr schwierig; andererseits stören die sich ausbildenden Raumladungen³⁾ sekundär das Feld in der Nähe des Ausgleichers. Für die Benutzung im künstlichen Felde bleibt uns daher als guter Ausgleicher im Linkeschen Sinne nur der Thomsonsche Tropfkollektor.

Zur Methodik der Messungen.

Bei der Abtastung des Feldes beschränkte ich mich stets auf die vertikale Längsmittlebene und zwar nur auf das mittlere Rechteck (150×120 cm). Die Modelle des Zeppelinschiffes und des Flugzeugs wurden in entsprechender Lage aufgehängt. Bei den Rotationskörpern genügte es, nur eine Feldhälfte auszumessen, da sich das Feld der anderen durch Spiegelung gegen die senkrechte Rotationsachse ergibt. Zur möglichst getreuen Wiedergabe der Deformationen auch in der

1) Vgl. F. Linke, Phys. Zeitschr. 4. S. 661. 1903.

2) Vgl. M. Moulin, Sur les égaliseurs de potentiel, Annales de Chimie et de Physique. VIII. p. 40. 1907.

3) F. Henning, Ann. d. Phys. 8. S. 893. 1902; K. Hoffmann, a. a. O. S. 48–50.

Feinstruktur wurde in jedem Falle das Potential von 400 bis 1200 Feldpunkten bestimmt, die ich naturgemäß am dichtesten in der Nähe des Modells wählte.

Um während der langen Dauer einer Versuchsreihe von 5—8 Stunden keine Abnahme des normalen Gefälles zu erhalten, mußte auf Konstanz der an die Platten gelegten Potentialdifferenz Wert gelegt werden. Aus diesem Grunde lud ich die spannungsliefernde Akkumulatorenatterie am Vortage jeder größeren Untersuchung neu auf und brachte sie kurz vor dem Versuch nochmals zur Gasbildung. Die inkonstante Überspannung nahm ich durch mehrfaches, momentanes Kurzschließen der Batterie fort und legte die Spannung erst nach Aufhören des „Kochens“ der Akkumulatoren an die Platten an. Da ferner die Isolation des Feldes infolge häufiger Auffrischung stets einwandfrei war, blieb das normale Gefälle während einer Versuchsreihe praktisch konstant. Falls eine größere Zahl von Akkumulatorenbatterien zur Verfügung steht, empfiehlt es sich, deren Kapazität durch Parallelschaltung mehrerer Serien zu erhöhen und damit die an die Platten gelegte Spannung von kleinen Isolationsfehlern möglichst unabhängig zu machen.

III. Fehlerquellen der Apparatur und Methode.

Als solche kommen in Betracht:

1. Eich- und Ablesungsfehler des Elektrometers.
2. Randwirkung des durch die feldbegrenzenden Platten gebildeten Kondensators und Inhomogenität des Feldes durch Raumladungen infolge Ionenwanderung.
3. Störungen des Verlaufs der Niveauflächen durch Kollektorsonde und Modellhalter.
4. Einfluß der Starrheit der Platten auf die Feldgestaltung.
5. Einfluß der Erdung der unteren Platte oder in der Nähe des Feldes stehender, geerdeter Leiter auf den Verlauf der Potentialflächen.
6. Störung des Feldes durch Luftströmungen, die geladenen Staub ins Feld bringen.

1. Eich- und Ablesungsfehler des Elektrometers.

Um die Empfindlichkeit des Wulfschen Elektrometers für den erforderlichen großen Meßbereich nicht herabsetzen zu

müssen und um die Verwendung einer Hilfsladung für den Innenkonduktor zu vermeiden, wurde nur die Stellung des linken Fadens abgelesen. Wesentliche Abweichungen der Eichkurven voneinander waren bei den etwa alle 14 Tage wiederholten Eichungen nicht festzustellen, ein Beweis dafür, daß die Beschaffenheit der Fäden auch bei stärkeren Beanspruchungen genügend konstant bleibt. Die Eichungen wurden nach einem Präzisionsvoltmeter von Siemens & Halske vorgenommen. 65 Skalenteile des Wulf entsprachen 210 Volt. Da das Elektrometer bequem auf $\frac{1}{10}$ Skalenteil genau abzulesen war, so betrug die Meßgenauigkeit $\frac{1}{3}$ Volt. Der Spannungsunterschied zwischen den 2 m voneinander entfernten Platten war im allgemeinen 320 Volt. Einer Ablesungsgenauigkeit von $\frac{1}{3}$ Volt entsprach demnach eine Genauigkeit von 2 mm für die Feststellung des Niveauflächenverlaufs in der Vertikalen.

2. Randwirkung des durch die feldbegrenzenden Platten gebildeten Kondensators und Inhomogenität des Feldes durch Raumladungen infolge Ionenwanderung.

Da die geladenen Platten des künstlichen Feldes einen Kondensator darstellen, so müssen die Feldlinien in der Nähe der Ränder eine Ausbiegung nach außen erfahren und damit die Niveauflächen an den Rändern der Platten zusammengedrängt werden.

Eine in der Wirkung gleichartige Zusammendrängung in der Nähe der Platten muß jedoch auch im Mittelteil des Feldes stattfinden, da bekanntlich jeder von Ionen erfüllte, geladene Kondensator infolge Ionenwanderung vor den Platten Raumladungsschichten mit entgegengesetztem Vorzeichen und damit einen Potentialgefälleanstieg an den Platten aufweist. In der Luft sind aber stets Ionen vorhanden. Bei den Dimensionen meines Versuchsfeldes war die Störung des gleichmäßigen Potentialabfalls durch Randwirkung und Raumladung an den Platten zwar klein, aber immerhin doch so erheblich, daß sie auch für die Feldmitte berücksichtigt werden mußte. Die Prüfung des Feldes auf diese Störung ergab, daß für unter Feldmitte gelegene Punkte die gemessenen Potentialwerte etwas verringert werden müssen. Bis 20 cm unter Feldmitte ist die Korrektur unmerklich, bis 35 cm beträgt sie 0,3 Volt, bis

50 cm 0,6 Volt, bis 60 cm 1 Volt. Entsprechend wurden für über Feldmitte gelegene Punkte die gemessenen Potentialwerte erhöht.

Fig. 1.

Fig. 1 zeigt den gemessenen Spannungsabfall in einer Mittelvertikalen. Für den nicht zugänglichen oberen und unteren Teil des Feldes wurde die Abfallkurve durch Extrapolation ergänzt. Die Vergleichsgrade zeigt den hypothetischen Abfall im ungestörten Felde.

3. Störungen des Verlaufs der Niveaulinien durch Kollektorsonde und Modellhalter.

Wie Hoffmann in der angeführten Arbeit S. 18—22 nachgewiesen hat, ist die Feldstörung durch eine geladene Kollektorsonde oder einen Modellhalter in der vertikalen Längsmittlebene zu klein, „um merklich meßbare Modifikationen des Verlaufs selbst stark gekrümmter Niveaulinien hervor-

zurufen“, wenn nur dafür Sorge getragen wird, daß Sonde und Halter horizontal in das Feld eingeführt werden.

4. Einfluß der Starrheit der Platten auf die Feldgestaltung.

Befindet sich das Luftfahrzeug in der freien Atmosphäre in einer Höhe über dem Erdboden, die das mehr als 30-fache seiner Vertikalabmessung beträgt, so darf man annehmen, daß sich das Störungsfeld der Niveauflächen um das Fahrzeug praktisch unbeeinflußt von der starren Erdoberfläche ausbilden kann. In unserem künstlichen Felde ist dieser Ausbildung eine Grenze gesetzt durch die relative Nähe der starren Platten. Wir müssen uns nun darüber Rechenschaft ablegen, inwieweit wir trotzdem berechtigt sind, den Niveauflächenverlauf im künstlichen Felde als ähnlich dem in der freien Atmosphäre anzusehen. Zu diesem Zwecke betrachten wir zunächst die Störung eines homogenen Feldes durch eine leitende Kugel und untersuchen dann den Einfluß der starren Platten auf die Feldgestaltung.

Denken wir uns durch die Kugel mit dem Radius R ein rechtwinkliges Koordinatensystem xyz mit dem Mittelpunkt als Nullpunkt gelegt in der Weise, daß die xy -Ebene in die zum Kugelpotential gehörige Niveaufläche fällt, während die z -Achse die Richtung der Feldlinien des ungestörten Feldes hat, so nimmt nach Drude-König¹⁾ ein beliebiger Punkt des deformierten Feldes das Potential an:

$$\varphi_a = E_a \cdot z \left(1 - \frac{R^3}{x^2 + y^2 + z^2} \right).$$

E_a ist die Feldstärke des homogenen Feldes senkrecht zu den Niveauflächen.

In welcher Weise macht sich nun der Einfluß der Grenzplatten auf die Feldgestaltung geltend?

Die Wirkung einer unendlich großen, leitenden Platte von bestimmtem Potential auf eine Kugel und deren Feld läßt sich bekanntlich in einfacher Weise nach der Thomsonschen²⁾ Methode der „elektrischen Bilder“ ersetzen durch den Einfluß

1) Drude-König, Physik des Äthers S. 58. 1912.

2) W. Thomson, Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism. p. 144. 1872.

einer gleichgroßen Kugel, die bezüglich der Platte das gleiche, aber entgegengesetzte Potential besitzt wie die gegebene Kugel und dieser auf der anderen Seite der Platte spiegelbildlich symmetrisch gegenübergestellt ist. Unter dem Einfluß beider Kugeln würde ein Feldpunkt das Potential:

$$\varphi_1 = E_a \cdot z \left(1 - \frac{R^3}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}^3} + \frac{R^3}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2h)^2}^3} \right)$$

annehmen, wobei h der Abstand des Kugelmittelpunktes von der Platte ist.

Bei 2 Platten, wie sie unser künstliches Feld begrenzen, liegen die Verhältnisse etwas schwieriger. Es sei die obere

Fig. 2.

Platte A (Fig. 2) auf ein gewisses, positives Potential $+V$, die untere Platte B auf $-V$ geladen; die isolierte Kugel K in der Mitte AB nimmt dann das Potential Null an. Gegen A hat die wirkliche Kugel negative Spannung, also liegt die fingierte Kugel K_A über A an $+2V$, entsprechend die Spiegelkugel K_B unter B an $-2V$. Streng genommen dürfen wir 2 Platten nicht durch 2 Spiegelbilder ersetzen, da ja z. B. A , als elastische Ätherfläche gedacht, unter der Einwirkung der 3 Kugeln K_A, K, K_B deformiert werden würde. Um A als Ebene

zu erhalten, müßten wir vielmehr alles unter A Liegende gegen A spiegeln; das Gleiche müßten wir gegen B tun. Dann aber würde wieder dieselbe Überlegung anzustellen sein; ich müßte wieder gegen A und B spiegeln u. s. f. Kurz, der Einfluß zweier starren Platten auf ein zwischen ihnen befindliches Feld läßt sich nur durch unendlichfache Spiegelung des Feldes gegen beide Platten ersetzen. Die mathematische Verfolgung dieser „Thomsonschen mehrfachen Spiegelung“ zur Berechnung des Potentialwertes irgendeines Punktes im Felde einer Kugel führt auf eine stark konvergierende, unendliche Reihe, die je nach der Zahl der berücksichtigten Glieder das gesuchte

Potential mit beliebiger Annäherung ergibt. Für unseren Fall, Kugel in Feldmitte, lautet sie mit Beschränkung auf 2 Spiegelbilder (Fig. 2):

$$\varphi = E_0 \cdot z \left[1 - \frac{R^3}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}^3} + \frac{R^3}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - h_1)^2}^3} - \frac{R^3}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z + h_1)^2}^3} \right],$$

worin h_1 diesmal den Plattenabstand bedeutet. Der deformierende Einfluß der beiden Platten wird durch die beiden letzten Klammergrößen dargestellt.

Die Vertikalabmessungen meiner Modelle wurden durchweg unter 28 cm gehalten; mit $R = 14$ cm als Kugelradius nehmen wir also den ungünstigsten Fall an. Um die Störungen durch Randwirkung und Raumladungen in der Nähe der Platten nicht über den Betrag einer kleinen Korrektur anwachsen zu lassen, habe ich ausnahmslos in dem Raume gemessen, der von Ebenen mit 60 cm Vertikalabstand und von solchen mit 75 cm Horizontalabstand vom Feldmittelpunkte (0,0) begrenzt war. Da die Störung durch die Platten in ihrer Nähe naturgemäß am größten ist, so genügt es, den Einfluß der Spiegelbilder auf den Punkt (0,60) zu untersuchen, um den extremen Korrektionswert für unsere Messungen zu finden.

Unter Annahme von 320 Volt Potentialdifferenz zwischen den Platten mit 2 m Abstand ergibt sich für den Punkt (0,60) die Deformation zu:

$$\varphi_D = \frac{320}{200} \cdot 60 \left(\frac{14^3}{140^3} + \frac{14^3}{260^3} \right) = 96 \cdot 0,001156 = 0,11 \text{ Volt.}$$

Dieser Wert liegt innerhalb der Meßgenauigkeit von $\frac{1}{3}$ Volt. Wir dürfen daher den Einfluß der Starrheit der Platten auf die Feldgestaltung vernachlässigen und die Verhältnisse in unserem künstlichen Felde bei der angegebenen Höchstabmessung der Modelle als praktisch ähnlich denen in der freien Atmosphäre ansehen.

5. Einfluß der Erdung der unteren Platte oder in der Nähe des Feldes stehender, geerdeter Leiter auf den Verlauf der Niveäuf Flächen.

Es liegt nahe, bei Anlegen der das Feld erzeugenden Spannung mit Vorliebe die untere Platte zu erden in der Meinung, damit den in der Natur gegebenen Verhältnissen am

nächsten zu kommen. In Wirklichkeit tritt dadurch eine Fehlerquelle in die Erscheinung, die einmal für Vernachlässigung zu groß und andererseits ihrer Größe nach zu unbeständig ist, um rechnerisch berücksichtigt zu werden. Wie

Fig. 3.

nebenstehende, schematische Fig. 3 zeigt, verlaufen in diesem Falle die Feldlinien von der oberen Platte nicht nur nach der unteren, sondern auch seitlich nach dem geerdeten Fußboden, so daß eine

Streuung der Feldlinien, damit eine Zusammendrängung der Niveauflächen an der oberen Platte die Folge ist. Aus diesem Grunde habe ich stets von einer Erdung der unteren Platte abgesehen und dafür das Nullpotential der Mitte des Feldes aufgezwungen. Dies erreichte ich in einfacher Weise durch Erdung der Mitte meiner Spannungsbatterie, deren Enden an die Platten gelegt wurden. Der Verlauf der Niveauflächen war dann zur Horizontalmittelebene spiegelbildlich symmetrisch. Die Potentialwerte wurden jedoch von der unteren, mit Null benannten Platte an positiv gezählt, um Wechsel des Vorzeichens zu vermeiden.

Ebenso müssen große, geerdete Leiter in der Nähe des Feldes, in erster Linie die Zimmerwände, eine Streuung der Feldlinien nach dieser Richtung zur Folge haben. Das Feld wurde daher so aufgestellt, daß es überall einen Mindestabstand von 2 m von den Wänden hatte. Unvermeidlich war der störende Einfluß des geerdeten, dünnen Eisenrahmens, der den Schlitten für die Abtastvorrichtung trug. Sein Abstand vom Felde wurde so gewählt, daß sich zwar in der ihm zugekehrten Feldseite noch eine geringe Störung nachweisen ließ, daß aber der Fehler in der Vertikallängsmittlebene, in der ausschließlich gemessen wurde, praktisch gleich Null war.

6. Störung des Feldes durch Luftströmungen, die geladenen Staub in das Feld bringen.

Zu längeren, eingehenden Untersuchungen gaben Störungen den Anlaß, deren Ursache zunächst nicht festzustellen

war. Sie bestanden in einer mehr oder weniger langsamen Veränderlichkeit der Potentialwerte eines und desselben Feldpunktes, so daß eine exakte Bestimmung des Niveauflächenverlaufs unmöglich war. Die Vermutung, Isolationsfehler oder Schwankungen der Batteriespannung könnten an diesem Umstande schuld sein, erwies sich als hinfällig.

Ebenso mußte die Annahme fallen gelassen werden, daß die Entstehung der sogenannten Wasserfallelektrizität infolge des „*Lenard*-Effektes“ die Unbeständigkeit der Potentialwerte hervorriefe. Dieser Wasserzerpratzeffekt besteht in einer Auslösung von Elektronen aus der unteren Platte durch das zerspritzende Wasser des Kollektors. Es wäre sehr wohl möglich gewesen, daß zur oberen, positiven Platte aufsteigende Elektronenschwärme als negative Raumladungen das natürliche Feld deformiert hätten. Da aber das Bedecken der unteren Platte mit einem Tuch, das nach Ebert und Lutz¹⁾ den Zerpratzeffekt so gut wie vollkommen dämpft, die zeitlichen Schwankungen des Potentials in keiner Weise verringerte, mußte auch von dieser Deutung Abstand genommen werden.

Ihre endliche Aufklärung schienen die Schwankungen durch Annahme lichtelektrischer Effekte zu finden. Die Störungen zeigten eine deutliche Zunahme mit der Intensität des in das Feld fallenden Sonnenlichtes; auch vergrößerte das Einschalten einer hochkerzigen, elektrischen Glühlampe die Amplitude der Schwankungen nicht unwesentlich. Unter den verschiedenen lichtelektrischen Wirkungen schied nun der bekannte *Hallwachseffekt* von vornherein aus, da es für die Schwankungen gleichgültig blieb, ob die Begrenzungsplatten belichtet wurden oder nicht. Ebenso kam die normale Gas-ionisation durch sehr kurzwelliges Licht nicht in Frage, da dieses weder in der durchs Fenster gegangenen Sonnenstrahlung, noch in der durch das Glas der Glühlampe gedrungenen Strahlung enthalten ist. Alle in dieser Richtung angestellten Versuche zeigten dementsprechend auch die Unabhängigkeit der Potentialschwankungen von lichtelektrischen Effekten. Jene waren also auf andere Ursachen zurückzuführen.

Als diese ergaben sich schließlich die geringen Luft-

1) H. Ebert u. W. Lutz, a. a. O.

strömungen, die stets in geschlossenen Räumen vorhanden sind und einmal durch Undichtigkeiten der Fenster- und Türfüllungen, andererseits durch Wärmequellen im Zimmer hervorgerufen werden. Diese Strömungen führen Teilchen mit sich, die durch reibungselektrische oder andere Vorgänge positiv oder negativ aufgeladen sind und von verschiedener Herkunft sein können. Es mag zum Teil mikroskopischer „Staub“ organischer und mineralischer Natur sein; doch glaube ich, daß in der Hauptsache solche Partikelchen beteiligt sind, die auch bei der Kondensation als Kerne eine Rolle spielen und in der Hauptsache von chemischem Herkommen¹⁾ sind. Wir haben es also hier mit Konvektionsströmen zu tun, bei denen fast stets die positiven Ladungen überwiegen, wie einmal meine Untersuchungen zeigten, wie es sich aber auch aus der bekannten Erscheinung ergibt, daß an elektrischen Schalttafeln und im Zimmer geführten Leitungen vor allem die negativen Pole bzw. Drähte von einer dicken Staubschicht umgeben sind. Der Einfluß des Sonnenlichtes ist daher nur als mittelbar so zu erklären, daß durch die damit verbundene Wärmestrahlung Luftströmungen hervorgerufen werden, die nun ihrerseits Raumladungen in das Feld bringen. Daher läßt sich eine hochkerzige Glühlampe in dieser Beziehung vollkommen ersetzen durch einen Bunsenbrenner. Beide haben infolge ihrer Wärmeabgabe, wie sie namentlich bei gasgefüllten Lampen ganz beträchtlich ist, starke Luftströmungen zur Folge.

Zur Vermeidung der Potentialschwankungen trug ich dafür Sorge, diese Konvektionsströme auf ein Mindestmaß zu beschränken. Aus diesem Grunde sah ich grundsätzlich von der Benutzung künstlicher Lichtquellen ab, brachte an Türen und Fenstern dichte Vorhänge an und ließ ein Fenster nur soweit frei, daß ich die Stellung der Elektrometerfäden gut ablesen konnte. Zur Vermeidung von Staub empfiehlt es sich, den Fußboden zu ölen oder ihn doch wenigstens, wie es in meinem Versuchszimmer geschah, öfter mit ölgetränktem Holzmehl aufwischen zu lassen. Durch diese Maßnahmen gelang es mir, die sonst unvermeidlichen Potentialschwankungen unter die Größe des Beobachtungsfehlers herabzudrücken.

1) Vgl. z. B. A. Wigand, Meteorolog. Zeitschr. S. 10. 1913.

IV. Ergebnisse.

Die Figg. 4—6 geben die Feldgestaltung in der Nähe eines *Zeppelinkreuzers* wieder. Das Modell (48 cm lang, 6 cm

breit und hoch) wurde aus Draht hergestellt und mit metallisiertem Ballonstoff überzogen. Die Aufladung geschah von außen her auf das Potential der im ungestörten Felde durch die Modellängsachse gehenden Ebene. Von deren mit

Null bezeichnetem Potentialwert wurde der Spannungsabfall nach oben positiv, nach unten negativ gezählt.

Beim ausgeglichenen Luftkreuzer mit abgestellten Motoren wird diese dem Modellpotential entsprechende Fläche infolge

Zeppelinmodell Querschnitt I der Fig. 7.
 $dV/dh = 1,15$ Volt/cm. $\frac{1}{3}$ Modellgröße.

Fig. 5.

Zeppelinmodell
 Querschnitt II der Fig. 7.
 $dV/dh = 1,15$ Volt/cm.

$\frac{1}{3}$ Modellgröße.

Fig. 6.

der durch die Gondeln hervorgerufenen Unsymmetrie der Kapazitätsverteilung etwas tiefer liegen, bei laufenden Motoren noch tiefer, da dann die ionisierten Auspuffgase als Linkescher Ausgleicher wirken.

Fig. 7 stellt die Feldstörung durch einen *Doppeldecker* dar. (Gesamtlänge des Modells 56 cm, Gesamthöhe 24 cm.) Die Trag- und Steuerflächen des Modells bestanden aus Metallblech: der hölzerne Rumpf sowie das Fahrgestell wurden durch Bekleben mit Stanniolpapier leitend gemacht. Da die Ausgleichung

des Flugzeugs beim Flug durch die Kollektorwirkung der Auspuffgase¹⁾ geschieht, so wurde das Modell entsprechend auf

Doppeldecker, von außen her auf das Potential 162,2 Volt aufgeladen. $dV/dh = 1,55 \text{ Volt/cm}$. Maßstab $\frac{1}{4}$ der Größe des Modells.

In einer Tiefe unter dem Fahrgestell gleich dem $\frac{1}{3}$ fachen der Gesamthöhe des Flugzeugs ist das Feld wieder normal.

Fig. 7.

1) A. Wigand, Die Naturwissenschaften. 7. S. 487. 1919.

das Potential derjenigen Niveaufläche von außen her aufgeladen, die im ungestörten Felde unmittelbar über dem Mittelteil des Rumpfes verlaufen würde. Für Messungen des Potentialgefälles im Flugzeuge ist zu beachten, daß das Deformationsbild der Niveauflächen mit der Lage des Flugzeugs im Raume (Anstellwinkel und Schräglage) variieren wird.

Fesselballon an geerdetem Kabel in etwa 75 m Höhe.
 $dV/dh = 1,46$ Volt/cm. (Maßstab $\frac{1}{4}$ der Modellgröße.)

Fig. 8.

Fig. 8 zeigt die Feldstörung durch einen geerdeten *Fesselballon*. Da dieser ebenso wie das mit dem geerdeten Metallkabel verbundene Leinensystem bei der in unseren Breiten vorhandenen Luftfeuchtigkeit der unteren Schichten als Leiter

zu betrachten ist, so wird der Ballon dauernd nahezu auf dem Erdpotential gehalten. Der infolge der natürlichen Ausgleichung der Ballonoberfläche zur Erde gehende Strom läßt sich leicht mittels in das Kabel eingeschalteten Galvanometers nachweisen. Das Modell wurde, stark idealisiert, aus Metall hergestellt und durch einen Kabeldraht mit der unteren Platte verbunden. Der eigentliche Ballonkörper war 44,5 cm lang und 13 cm hoch, der Abstand der unteren Korbkante vom oberen Ballonrande betrug 34 cm, von der unteren Platte 16 cm. Infolge der Beschränkung durch die Felddimensionen konnte die Deformation nur für eine verhältnismäßig geringe Höhe dargestellt werden. Die während des Feldzuges benutzten Ballone hatten eine Länge von etwa 25 cm. Unsere Figur stellt also einen Ballon in nur etwa 75 m Höhe vor. Trotzdem ist der Potentialabfall unmittelbar über der Mitte des Ballons, gerechnet auf eine Strecke gleich 0,1 der Höhe des Ballonkörpers das Zehnfache des normalen Gefälles, am Ventil (rechts seitlich) etwa das Doppelte. Für 1000 m Höhe, in der während des Krieges im allgemeinen beobachtet wurde, dürfte dieses Verhältnis auf etwa 100:1 steigen. In dieser Höhe ist der Gradient¹⁾ normalerweise 25 Volt/m, bei Gewitterlage das 20- bis 50fache dieses Wertes. Wir hätten demnach über dem Ballon bei schönem Wetter mindestens 2,5 Kilovolt/m, bei Gewitterneigung 50—125 Kilovolt/m. Wenn diese Spannungen auch noch nicht das zu einer Funkenentladung erforderliche Gefälle erreichen, so besteht doch die Gefahr, daß eine Blitzentladung aus einer in der Nähe befindlichen Gewitterwolke ihren Weg auf den Ballon als der Bahn des geringsten Widerstandes nimmt.

Wie sich demgegenüber die Feldverteilung um einen gegen Erde isolierten Fesselballon ausbildet, zeigt Fig. 9. Die Isolation bestand in einem auf die untere Platte gelegten Stück gut abgeflammten Paraffins, auf dem das freie Ende des Kabeldrahtes befestigt war. Das Modell lud sich in diesem Falle durch natürliche Ausgleichung auf. Die dem Ballonpotential (154,8 Volt) entsprechende, indifferente Niveaufläche verläuft in etwa $\frac{1}{4}$ Höhe des eigentlichen Ballonkörpers. Auch hier zeigt sich ein höheres

1) Nach K. Kähler, *Luftelektrizität* (Götschen), S. 47. 1913.

Gefälle über dem Modell, jedoch beträgt es für die gleiche Strecke, die beim geerdeten Ballon angenommen wurde, nur das Doppelte des normalen Gefälles, am Ventil bedeutend weniger. In 1000 m Höhe würde die indifferente Niveaufläche infolge der größeren Kapazität des Kabels zwar noch etwas tiefer liegen und damit das Gefälle über dem Ballon relativ zum normalen

Gegen Erde isolierter Fesselballon in etwa 75 m Höhe.
 $dV/dh = 1,54 \text{ Volt/cm}$. (Maßstab $\frac{1}{4}$ der Modellgröße).

Fig. 9.

noch etwas zunehmen, jedoch dürfte es das 4fache des normalen Gradienten nicht übersteigen. Bei Schönwetterlage hätten wir also 0,1 Kilovolt/m, bei Gewitterneigung 2—5 Kilovolt/m. Das sind Spannungen, die nicht entfernt die Größenordnung des Funkenpotentials erreichen.

Dagegen treten in diesem Falle an der Isolationsstelle gewaltige Potentialdifferenzen auf, da sich sämtliche Niveauflächen, die unter dem Ballonkörper liegen, durch die Isolation

hindurchdrängen. Der Gradient fällt bei normalem Wetter von etwa 100 Volt/m am Boden bis auf 25 Volt/m in 1000 m Höhe. Da der Abfall nach einer Exponentialfunktion vor sich geht, so beträgt der Mittelwert etwa 50 Volt/m. Nehmen wir eine 20 cm starke Isolierschicht an, so ist an dieser Stelle das Gefälle bei 1000 m Ballonhöhe bei normalem Wetter etwa

Modell des „Düsseldorfer II“ natürlich ausgeglichen.
(Maßstab $\frac{1}{8}$ der Modellgröße.)

Fig. 10.

$\frac{50}{0,2} = 250$ Kilovolt/m, bei Gewitterneigung 5000—12500 Kilovolt/m. Letztere Spannungen liegen weit über dem Funkenpotential und würden unbedingt starke Entladungen zur Folge haben, damit aber eine Gefahr für die Bedienungsleute der Ballonwinde bedeuten.

Praktisch dürfte sich eine gute Isolierung von Fesselballonen mit beweglicher Winde kaum durchführen lassen.

Fig. 10 zeigt die Feldgestaltung um einen *natürlich ausgeglichenen Freiballon*. Das Modell (Durchmesser der Ballonkugel 25 cm,

Gesamthöhe 38,5 cm) wurde dem Ballon „Düsseldorf II“ (Kugeldurchmesser 16,3 m, Inhalt 2200 cbm), mit dem Wigand und Everling die zweite der in der Einleitung erwähnten Hochfahrten unternahmen, getreu im Maßstabe 1:65,2 nachgebildet und mit paraffinierten Seidenfäden unter Zwischenschaltung von Bernsteinstücken an der oberen Platte aufgehängt. Ballonkugel und Korb bestanden aus Weißblech, das „Leinensystem“ aus dünnen Kupferdrähten. Auch hier liegt die dem Modellpotential entsprechende Niveaufläche infolge der Unsymmetrie des Systems unter der Äquatorebene der Ballonkugel.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle auf die Verteilung der elektrischen Ladungen auf dem Ballon einzugehen. Im Felde (obere Platte positiv geladen) wird der Ballon in seinem oberen Teile durch Influenz eine negative Oberflächendichte, in seinem unteren Teile eine positive elektrische Erregung annehmen. Nur auf der unendlich schmalen Kugelzone, an der die Potentialfläche des Ballons ansetzt und zwar rechtwinklig¹⁾ ansetzt, ist die Oberflächendichte gleich Null. Von dieser indifferenten Zone aus nimmt die Oberflächendichte nach beiden Seiten hin absolut zu und erreicht ihre größten Absolutwerte an Stellen höchsten Potentialabfalls der Umgebung, in unserem Beispiel also am Ventil und am Korbboden. Infolge der natürlichen Ionisation der Luft tritt über der neutralen Zone dauernd ein elektrischer Strom ein und unter ihr aus. Wir dürfen also die gesamte Oberfläche als einen Ausgleichser sehen, dessen Wirkung an den verschiedenen Stellen der dort vorhandenen Erregung proportional ist. Der dabei im Ballon fließende Strom läßt sich leicht mittels Galvanometers nachweisen, wie das Wigand im Frühjahr 1916 an isolierten Feldfesselballonen getan hat.

Steigern wir auf irgendeine Weise durch einen Ausgleichskollektor die Ausgleichswirkung eines bestimmten Oberflächenelementes z. B. am Korbboden, so tritt eine kurze Zeit lang ein stärkerer Strom aus. Dies hat notwendig eine Erniedrigung des Modellpotentials, damit ein Tieferansetzen der Ballonäquipotentialfläche am Ballon und eine Verlagerung eines Teils der bisher unter dem Ballon durchgehenden Niveauflächen über

1) Vgl. Cl. Maxwell, Vol. I. § 115.

ihn zur Folge. Steigern wir die Wirkung des Zusatzausgleichers derart, daß die natürliche Ausgleiche (Zerstreuung) durch die Ballonoberfläche nicht mehr dagegen in Frage kommt, so läßt der Ausgleicher keine Potentialdifferenz zwischen sich und der unmittelbaren Umgebung bestehen, seine Oberflächendichte wird Null, d. h. die Niveaufläche des Ballons tritt dann in den Ausgleicher ein.

Es sei jedoch nochmals betont, daß dieser Fall nur dann eintritt, wenn die natürliche Zerstreuung im Vergleich zur Wirkung des Ausgleichers verschwindend klein ist.

Freiballonmodell aufgeladen auf das Potential der im ungestörten Felde
0,4 cm unter Korbbodenhöhe gelegenen Niveaufläche.
 $dV/dh = 1,14 \text{ Volt/em.}$ (Maßstab $1/10$ der Modellgröße.)

Fig. 11.

Beispiele für die Feldgestaltung bei Aufladung von außen her sind die Figg. 11—14. Sie haben das Gemeinsame, daß die Potentialfläche des Modells im ungestörten Felde frei

Feldstörung durch das Modell des „Düsseldorf II“
($\frac{1}{12}$ Modellgröße),
aufgeladen auf das Potential der im ungestörten Felde:

Fig. 12.

a) 12 cm unter dem Ballon
liegenden Niveaufläche.

Fig. 13.

b) 20,5 cm unter dem Ballon
liegenden Niveaufläche.

Fig. 14.

c) 30 cm unter dem Ballon
liegenden Niveaufläche.

unter dem Ballon durchgehen würde. Dabei wurde das Modell künstlich mit Hilfe der Akkumulatorenatterie auf das Potential solch einer ursprünglich ungestört unter dem Ballon verlaufenden Niveaufläche aufgeladen. Der Ballon wurde im Falle der Fig. 13 mit Hilfe einer Akkumulatorenatterie auf 78,7 Volt aufgeladen und derart durch einen horizontalen Halter im Felde aufgehängt, daß die ungestörte 78,7 Volt-ebene 20,5 cm unter dem Modell durchgegangen wäre. Besonders von Interesse ist der Fall, in dem die Niveaufläche des Modells aus 20 cm Entfernung unter dem Ballon heraufgezogen

wird und dabei in den Korbboden eintritt (Fig. 13). Vorausnehmend sei bemerkt, daß diese Feldgestaltung identisch ist mit der durch die Wirkung eines starken Ausgleichers am Korbboden gegebenen (Fig. 15), wobei die natürliche Zerstreung durch den Ballon relativ verschwindend ist. Infolgedessen kann man zur Vereinfachung der Meßmethode eine beabsichtigte Feldgestaltung anstatt durch Wirkung von Kollektoren durch Aufladung von außen her erreichen.

Bezüglich der Modelldimensionen sei noch erwähnt, daß die Gesamthöhen sowie der Kugeldurchmesser der Figg. 11—15 und 17 dieselben sind, daß sich aber Fig. 11 in den Korbmaßen von den übrigen Figuren unterscheidet.

Um die Everlingschen Relativmessungen auszuwerten, brachte ich am Korbboden einen kräftigen Tropfkollektor an. Hinsichtlich der von Everling gebrauchten Meßanordnung verweise ich auf die bei der Freiballonfahrt mit dem Ballon „Barbara“ (Kapitel VI) benützte. Sie ist der Everlingschen getreu nachgebildet.

Die Verwendung eines Tropfkollektors entspricht einmal der Ausgleichung durch den Tropsack Everlings am besten, und ferner ist es vor allen Dingen möglich, die Auflösungsstelle des Wasserstrahls auf mm genau in jede gewünschte Höhe zu legen. Nach der von Ebert und Lutz¹⁾ angegebenen Methode wurde die Ballonkugel durch den hohlen Modellhalter etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Dieses lief dann durch ein dünnes, senkrecht Roh, das in Höhe des Korbbodens durch ein mit einem kleinen Loch versehenes Blech geschlossen war. In dieses Loch war ein feiner Draht eingeführt, von dessen unterem Ende etwa 4 mm unter dem Korbe das Wasser in kleinen Tropfen abfiel. Da die Lage des Referenzpunktes infolge der vorstehend geschilderten Abtropfvorrichtung vom Druck des Wassers unabhängig war, konnte ich von der Verwendung eines ständig Wasser nachliefernden, außerhalb des Feldes stehenden Gefäßes (vgl. Ebert und Lutz)¹⁾ absehen, so daß nur die Kapazität des Ballons und des Halters durch den Ausgleicher aufzuladen war; die praktische Ladungsdauer betrug 1,5—2 Minuten.

1) H. Ebert u. W. Lutz a. a. O. S. 195.

Fig. 15 zeigt den Feldverlauf des durch den Tropfkollektor am Korbboden ausgeglichenen Ballons. Ein Vergleich mit Fig. 13 ergibt die völlige Identität beider Feldbilder und damit die Tatsache, daß die Feldstörung eines Modells ausschließlich von

Modell des „Düsseldorf II“, durch starken Tropfkollektor 0,4 cm unter Korbboden vollkommen ausgeglichen.

$dV/dh = 1,33 \text{ Volt/cm}$, (Maßstab $\frac{1}{8}$ Modellgröße.)

Fig. 15.

seinem Potential abhängig ist gleichgültig, in welcher Weise die Aufladung auf dieses Potential erfolgt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß nicht ionisierende Ausgleicher, z. B. Radiumkollektoren, zur Aufladung verwandt werden, da die Ionen dann noch sekundär die Feldverteilung beeinflussen. Wie zu erwarten war, zeigt Fig. 15 in der Nähe des Ausgleichers ein sehr schwaches Feld und eine starke Auflockerung der Niveaulinien unter dem Korb. Für Gefällemessungen in unmittel-

barer Nähe des Korbes ist daher die Methode der Ausgleichung am Korb oder dicht darunter ungünstig. Um so vorteilhafter ist sie für Messungen der Leitfähigkeit, Beweglichkeit und Iondichte der Luft, da hier ein starkes Feld auf Ionen verschiedenen Vorzeichens ungleich wirken und damit besondere Reduktionen bedingen würde. Da das Gefälle etwa 30 m unter dem Ballon wieder normal ist, genügt es zu Absolutmessungen mit 2 Meßkollektoren, diese in gewissem Abstände voneinander etwa 30 m aus dem Korb herabzulassen. Ebenso ist für Ausgleichung am Korb die Everlingsche Relativmethode mit nur einem Meßkollektor anwendbar (vgl. Einleitung); nur muß die Meßsonde genügend tief unter dem Ballon angebracht werden, damit der Potentialunterschied zwischen ausgeglichenem Ballon und Meßsonde meßbare Werte erreicht.

V. Nachprüfung der Ergebnisse bei einer Freiballonfahrt.

Durch Unterstützung aus der „Aerophysikalischen Stiftung Halle“ wurde mir die Nachprüfung meiner Ergebnisse gelegentlich der Fahrt mit dem von der Luftfahrzeug G. m. b. H. überlassenen Ballon „Barbara“ (Inhalt 900 m³) am 18. Dezember 1919 ermöglicht, bei der die Herren Prof. Dr. Wigand und cand. phys. Koppe neben der Führung und eingehenden, meteorologischen Beobachtungen Leitfähigkeitsbestimmungen und Messungen mit 2 Ebertschen Ionenzählern anstellten, während ich selbst Potentialgefällemessungen vornahm.

Hinsichtlich der *Versuchsanordnung* hielt ich mich streng an die von Everling¹⁾ gemachten Angaben. Der gesamte Ballon, einschließlich Leinensystem und Korb, wurde durch Umspannen mit dünnem Eisendraht zu einem eindeutigen Leiter gemacht. Mit diesem Draht verbunden wurde der Ausgleicher des Ballons, nämlich das metallische Ausflußrohr *a* (Fig. 16) des schon von Everling benutzten Tropfsacks, der zur Vermeidung des Gefrierens der Füllung eine gesättigte

Fig. 16.

1) E. Everling, a. a. O.

Chlorkalziumlösung enthielt. Der Sack wurde so angebracht, daß der Referenzpunkt 25 cm unter einer Korbecke lag. In der Mitte einer Längsebene des Korbes hing isoliert das spannungsmessende Instrument *c*, ein Wulfsches 2-Faden-elektrometer geringer Empfindlichkeit. Die Fäden waren dauernd durch einen isoliert geführten Draht, der das Ballonfeld nicht in meßbarer Weise stört, mit einem Meßkollektor *b* verbunden, der in 1,25 m Entfernung von der erwähnten Korbecke in gleicher Höhe mit dem Referenzpunkt des Tropfsacks lag. Als Meßsonde diente zunächst ein Spritzkollektor ¹⁾ Lützescher Konstruktion mit kombinierter Druck- und Saugwirkung (Zerstäuber), dessen Aufladezeit 3 Sekunden beträgt. Es wurde nach einigen Messungen durch eine starke Poloniumsonde ersetzt, um deren Wirkung in der freien Atmosphäre vergleichend festzustellen. Vorausnehmend bemerke ich, daß sie im Mittel die gleiche Potentialdifferenz anzeigte wie der Spritzkollektor.

Während der Versuchsreihe fuhr der Ballon dauernd, von geringen Schwankungen abgesehen, in derselben Höhe von rund 3 km etwa 100—200 m über einer dichten, zusammenhängenden Wolkendecke. Wir werden deshalb auch ziemlich übereinstimmende Werte erwarten dürfen. Nachstehend gebe ich das Protokoll meiner Messungen.

I. Das Elektrometergehäuse wurde mit dem Korbe leitend verbunden.

a) Als Meßsonde diente der Spritzkollektor.

Zeit h m	Relativer Abfall auf 1,25 m			Höhe, km	
	Einzelwerte in Skalenteilen Volt		Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
1 42	15,8	44,5	} 45,1	2,84	} 2,84
1 43	16,0	45,7		2,84	
1 52	15,8	44,5	} 44,3	3,04	} 3,02
1 56	15,7	44,0		3,00	

1) Näheres vgl. G. Lütze, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Ges. 15. S. 1101. 1913.

b) Der Spritzkollektor wurde durch ein Poloniumpräparat ersetzt.

Zeit h m	Relativer Abfall auf 1,25 m			Höhe, km	
	Einzelwerte in Skalenteilen	Volt	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
2 04	16,0	45,7	44,4	2,98	2,98
2 06	15,3	41,6		2,98	
2 07	15,8	44,5		2,98	
2 10	16,0	45,7		2,96	

Das Gesamtmittel der Versuchsreihe I ergab sich zu 44,5 Volt in 2,95 km Höhe.

II. Als Meßkollektor diente weiter die Poloniumsonde. Die Verbindung zwischen Elektrometergehäuse und Korb wurde aufgehoben, dafür das Gehäuse durch einen isoliert geführten Draht mit einem zweiten, ebenfalls als Meßkollektor dienenden Poloniumpräparat verbunden, das 5,45 m unter dem Korbboden hing. Es erfolgte nur eine Ablesung etwa um 2^h 20^m, die 17,0 Skalenteile = 51,4 Volt ergab. Die gleichzeitige Ballonhöhe war 2,85 km.

Die verhältnismäßig geringe Zahl der Einzelbeobachtungen erklärt sich aus der kurzen Zeit, die für Messungen in ein und derselben Höhe zur Verfügung stand.

Diskussion der Beobachtungen.

Der Vergleich der beiden Mittelwerte der Tab. Ia zeigt das Schwanken der relativen Gefällewerte im richtigen Sinne, d. h. größeren Höhen entsprechen kleinere Gradienten. Das Gleiche gilt für die Gesamtmittel der Tabellen Ia (44,7 Volt in 2,93 km) und Ib (44,4 Volt in 2,98 km).

Vergleichen wir weiter die im Ballon gefundenen Werte mit den entsprechenden, am Modell des „Düsseldorf II“ nach Fig. 15 im künstlichen Felde beobachteten, so verhalten sich am Modell die zur Versuchsreihe I und II gehörigen Potentialdifferenzen zueinander wie: Punkt A gegen Ballon: Punkt B gegen A = 0,8 : 7,7 = 1 : 26, während die im Freiballon gemessenen Potentialdifferenzen I und II im Verhältnis: 44,5:51,4 = 1:1,15 stehen.

Dieser Unterschied zwischen der Messung im Freiballon

und der im künstlichen Felde kann seine Ursache nur darin haben, daß die Feldgestaltung bei der Freiballonfahrt grundverschieden von der der Fig. 15 war. Da nun an der Gültig-

Modell des „Düsseldorfer II“, durch Ausgleichsleiter 0,4 cm unter Korbboden unvollkommen ausgeglichen.
 $dV/dh = 1,43 \text{ Volt/cm.}$ (Maßstab $\frac{1}{6}$ Modellgröße.)

Fig. 17.

keit des Prinzips der elektrischen Ähnlichkeit nicht zu zweifeln ist, kann die Unstimmigkeit nur durch ungenügende Ausgleichswirkung des Tropfsacks erklärt werden. Wir hatten

früher betont, daß die Feldverteilung der Fig. 15, insbesondere das Eintreten der Ballonniveaufäche in den Ausgleicher nur dann zustande kommt, wenn die natürliche Zerstreuung der Ballonoberfläche gegen die Wirkung des Zusatzausgleichers verschwindet. Bei unserer Fahrt mit „Barbara“ traf das nun zweifellos nicht zu. Infolgedessen muß die Niveaufäche in diesem Fall höher am Ballon ansetzen.

Ein ungefähres Bild davon, wie die Feldverteilung um die „Barbara“ tatsächlich war, gibt Fig. 17. Bei der Aufnahme dieses Diagramms tropfte der Ausgleicher weniger kräftig als bei Fig. 15; durch Steigerung der Tropfstärke konnte das Feldbild von Fig. 17 in das der Fig. 15 übergeführt werden. Bei Fig. 17 entspricht Punkt *A* dem Ort der Meßsonde bei der Versuchsreihe I im Abstände 1,25 m vom Ballon mit dem Durchmesser 12 m, Punkt *B* dem Ort des 5,45 m herabgelassenen Radiumpräparats der Versuchsreihe II. Es ergibt sich das Verhältnis von *A* gegen den Ballon zu *B* gegen *A* wie: $(120,5 - 112,0) : (112,0 - 102,5) = 8,5 : 9,5 = 1 : 1,12$, also fast das gleiche wie $I : II$ (im Freiballon) $= 1 : 1,15$ (siehe oben); der Unterschied liegt innerhalb der Meßgenauigkeit. Fig. 17 stellt also die Verhältnisse bei der Ballonfahrt befriedigend dar und kann daher zur Absolutreduktion der gemessenen Potentialdifferenzen verwandt werden.

Der Absolutwert des Gefälles. Nach der Definition von Ebert und Lutz¹⁾ ist „der Reduktionsfaktor *R* die Zahl, mit der man das scheinbare, direkt in der Nähe des Ballons gemessene, aber eben darum nicht richtige Gefälle zu multiplizieren hat, um das wahre Gefälle zu erhalten“.

Für den durch ein Kreuz gekennzeichneten Punkt *A* der Fig. 17 ergibt sich gegen den Ballon die Potentialdifferenz: $120,5 - 112,0 = 8,5$ Volt. Der Abstand des Punktes *A* vom Referenzpunkt des Modellausgleichers ist 2,6 cm. Da der normale Spannungsabfall für die gleiche Strecke 3,72 Volt beträgt, bestimmt sich der Reduktionsfaktor zu $\frac{3,72}{8,5} = 0,44$. — Danach ergibt sich das absolute Gefälle, gemessen in 2950 m

1) H. Ebert u. W. Lutz a. a. O. S. 184.

Höhe in „Barbara“, zu:

$$\frac{dV}{dh} = 44,5 \cdot 0,44 \text{ Volt}/1,25 \text{ m} = 15,7 \text{ Volt/m.}$$

Dieser Wert wird etwas von dem wirklichen abweichen, da die Maße der „Barbara“ (Kugeldurchmesser: Gesamthöhe = 12,4 : 20,3) etwas von denen der Fig. 17 zugrunde liegenden des „Düsseldorf II“ (12,4 : 19,2) verschieden sind. Die gleichzeitigen Potsdamer Bodenmessungen des Meteorologischen Observatoriums gaben folgende Gradienten:

Zeit	11—12 ^h	12—1 ^h	1—2 ^h	2—3 ^h
Volt/m	46	60	167	111

Der Ballon befand sich während dieser Zeit zwischen Bitterfeld und Görlitz. Der gefundene Wert stimmt gut mit dem bei früheren Messungen ermittelten überein.

Wetterlage während der Fahrt: Vorderseite eines schnell von NW heranziehenden Tiefs.

VI. Bestimmung des Everlingschen Reduktionsfaktors.

Nach den vorstehenden Überlegungen fiel ebenso wie bei der Fahrt mit der „Barbara“ auch bei der Everlingschen Hochfahrt die natürliche Zerstreuung durch die Ballonoberfläche noch stark gegenüber der Wirkung des Korbausgleichers ins Gewicht. Die Fig. 15 kann daher für die Bestimmung des Everlingschen Reduktionsfaktors nicht in Frage kommen. Ebenso dürfen wir Fig. 17 nicht zugrunde legen, da diese nur für eine ganz bestimmte Zerstreuung der Ballonoberfläche gilt, diese aber von der Leitfähigkeit der Luft abhängt. Da nun nach Messungen von Wigand¹⁾ die Leitfähigkeit mit der Höhe stark zunimmt, so daß sie in 9 km das mindestens 40fache derjenigen am Erdboden beträgt, so wird die Wirkung des Ausgleichers mit zunehmender Höhe immer mehr gegen die natürliche Zerstreuung zurücktreten und in großen Höhen vielleicht sogar gegen diese verschwinden. Gleichbedeutend damit ist ein Höheransetzen der Niveaufläche des Ballons und eine Abnahme des Reduktionsfaktors mit zunehmender Höhe. Wir können daher nur die beiderseitigen Grenzen angeben, innerhalb deren der Everlingsche Reduktionsfaktor liegen wird.

1) A. Wigand, Verhandl. d. Deutsch. Physik. Ges. 16. S. 232. 1914.

Die untere Grenze für R' ist uns gegeben für große Zerstreung, der gegenüber die Ausgleichwirkung Null ist, d. h. die rein natürliche Ausgleichung des Ballons nach Fig. 10. Der Punkt A' entspricht dem Ort des Everlingschen Meßkollektors in 1,25 m Abstand vom Ballon mit dem Durchmesser 16,3 m. Der Potentialunterschied von A' gegen den Ballon ist: $(175,6 - 163,2) = 12,4$ V.; der normale Abfall für die gleiche Strecke von 1,9 cm ist 2,7 V., daraus ergibt sich $R_1' = \frac{2,7}{12,4} = 0,22$.

Die obere Grenze gibt uns einen Vergleich mit der Feldgestaltung um die „Barbara“ nach Fig. 17. Für den größeren Durchmesser des „Düsseldorf II“ (16,3 m) entspricht dem Ort des Meßkollektors im Abstand 1,25 m vom Ballon jetzt der Punkt A' mit dem Abstand 1,9 cm (bei „Barbara“ 2,6 cm). Der Potentialunterschied von A' gegen das Modell ist nach Fig. 17: $120,5 - 112,4 = 8,1$ Volt., der normale Abfall für 1,9 cm beträgt 2,7 Volt. Daraus ergibt sich der Reduktionsfaktor zu $R_2' = \frac{2,7}{8,1} = 0,33$. Daß R_2' wirklich die äußerste obere Grenze des Everlingschen Reduktionsfaktors darstellt, zeigen folgende Überlegungen.

Da die Kugeloberfläche des „Düsseldorf II“ fast doppelt (1,8:1) so groß ist wie die der „Barbara“ und damit die natürliche Zerstreung im Verhältnis zur Ausgleichwirkung wesentlich größer wird, so wird die Ausgleichsfläche des Ballons am „Düsseldorf II“ höher ansetzen und der Reduktionsfaktor kleiner werden als bei der „Barbara“.

Ferner war nach einer persönlichen Mitteilung von Hrn. Dr. Everling die Tropfenzahl des Ausgleichers pro Minute bei seiner Hochfahrt erheblich geringer als bei meiner Fahrt mit der „Barbara“, was ebenfalls in der Richtung einer Verkleinerung des Reduktionsfaktors wirkte.

Aus diesen Gründen liegt das für Everlings Hochfahrt maßgebliche Feldbild zwischen der Fig. 10 und der Fig. 17, entsprechend der Everlingsche Reduktionsfaktor zwischen 0,33 und 0,22 (siehe oben). Letzterer Wert wird dem für große Höhen (über 6 km) gültigen sehr nahe kommen.

Die von Everling¹⁾ angegebenen Potentialdifferenzen sind

1) E. Everling, a. a. O.

die Originalablesungen selbst, beziehen sich mithin auf 1,25 m Entfernung vom Korbe. Der von Everling mit R bezeichnete Reduktionsfaktor ist demnach $R = \frac{4}{3} R'$. Seine Angaben sind also mit $0,26 > R > 0,18$ zu multiplizieren, um das absolute Gefälle in Volt/m zu erhalten. Dann ergeben sich für den für große Höhen wahrscheinlichen Faktor $R = 0,18$ folgende Gradienten:

Seehöhe (Mittel) km	Relativer Abfall V/1,25 m (Mittel) V/1,25 m	Absolutwert des Gradienten für $R = 0,18$ V/m
3,54	94	17,0
6,30	37	6,7
8,61	36	6,5
8,80	32	5,8
8,93	30	5,4
8,97	22	4,0
8,87	30	5,4

Da für große Höhen die Ausgleichwirkung kaum gegen die natürliche Zerstreung in Frage kommt, darf man 4 V/m wohl als guten Näherungswert des Gradienten in 9 km Höhe annehmen.

VII. Kritik des Einkollektormessverfahrens nach Everling.

Die Unsicherheit der bei Everlings Hochfahrt gefundenen Gradienten könnte sein Einkollektormessverfahren für exakte Messungen als unbrauchbar erscheinen lassen. Tatsächlich ist die erhaltene Ungenauigkeit nur auf unzureichende Versuchsbedingungen zurückzuführen. Die Hauptursache des teilweisen Mißerfolges der Hochfahrt ist die starke Zerstreung durch die Ballonoberfläche, die damals in ihrer Bedeutung unbekannt war oder doch unterschätzt wurde. Auf Grund des vorliegenden Versuchsmaterials läßt sich diese Fehlerquelle beheben durch Verwendung eines sehr starken Ausgleichers und — nach einem neuerlichen Vorschlage von Everling, der sich übrigens mit dem Linkeschen¹⁾ bei der Zweikollektormethode deckt — durch Anbringung des Ausgleichers an der Stelle, an der die

1) F. Linke, Luftelektr. Messungen bei 12 Ballonfahrten. Abhdl. d. Gött. Ges. d. Wiss. Math.-phys. Kl. III. 5. S. 22. 1904.

neutrale Niveaufläche bei natürlicher Ausgleichung ansetzt (Fig. 10). Damit wird der Zustand, der sich ohnehin durch die Eigenzerstreuung des Ballons herausbildet, eindeutig festgelegt.

Nachdem so die Brauchbarkeit des Everlingschen Verfahrens erwiesen ist, liegen die Vorteile für die praktische Verwendung im Luftfahrzeug auf der Hand. Was Vereinfachung der Apparatur im engen Korb bedeutet, weiß jeder Freiballonfahrer zu würdigen, umsomehr, wenn er sich bei Hochfahrten des Atmungsgeräts bedient hat.

VIII. Zusammenfassung.

1. Die Feldgestaltung in der Umgebung eines Zeppelinluftschiffes, eines Flugzeuges, eines Fessel- und Freiballons wurde experimentell an Modellen im künstlichen, elektrostatischen Felde bestimmt. Die Modellmessungen wurden bei einer Freiballonfahrt nachgeprüft.

2. Der störende Einfluß geringer Luftströmungen auf die Feldgestaltung wurde auf geladene, in der Luft suspendierte Teilchen zurückgeführt.

3. Die natürliche Zerstreung der Ballonoberfläche hat bei nicht sehr starken Ausgleichern großen Einfluß auf die Feldgestaltung. Dieses Ergebnis der Feldmessungen wurde im Freiballon bestätigt.

4. Die Feldverteilung um ein Modell hängt außer von seiner Gestalt nur von seinem Potential ab, gleichgültig auf welche Weise die Aufladung erfolgt ist. Vorausgesetzt ist hierbei, daß keine ionisierenden Ausgleicher verwandt werden.

5. Durch Ermittlung des Reduktionsfaktors für die Everlingschen Relativwerte des Spannungsabfalls ergaben sich angenähert die Absolutwerte des Gradienten für verschiedene Höhen bis 9 km. Das Gefälle beträgt in 9 km Höhe etwa 4 V/m.

6. Das Einkollektormeßverfahren nach Everling ist bei geeigneter Stärke und Anordnung des Ausgleichers für Messungen oder Registrierungen im Luftfahrzeug durchaus geeignet.

Die vorliegende Arbeit wurde von Mitte Sommersemester 1914 bis Ende Juli 1914 und von Mitte Januar 1919 bis Ende

April 1920 im Physikalischen Institut der Universität Halle angefertigt.

Den Herren Geh. Regierungsrat Prof. Dr. Mie und Prof. Dr. Schmidt bin ich für die freundliche Überlassung der Apparatur und der benötigten Hilfsmittel sowie für mannigfache Anregungen zu großem Danke verpflichtet. Ebenso bin ich den Herren Dr. Everling (Privatdozent an der Technischen Hochschule Berlin) und Prof. Dr. Herweg für wertvolle Ratschläge und Fingerzeige sehr verbunden.

Zum Schluß ist es mir ein besonderes Bedürfnis, Hrn. Prof. Dr. Wigand, der mir das Thema der Arbeit stellte und ihre Durchführung leitete, sowie mir die Teilnahme an der Freiballonfahrt „Barbara“ ermöglichte, auch an dieser Stelle für die vielseitigen Anregungen und für die freundliche Unterstützung bei meiner Arbeit meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

(Eingegangen 8. Juli 1920.)