Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München

1911. Heft II

Mai- bis Julisitzung

München 1911

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften

in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

KGL. BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

II. Messung des vertikalen Leitungsstromes Luft-Erde im Jahre 1909.

Von **Dr. C. W. Lutz.**

Vorgelegt von H. Ebert in der Sitzung am 10. Juni 1911.

Das normale elektrische Erdfeld wird vorzugsweise durch drei Größen gekennzeichnet: durch das Potentialgefälle, die Leitfähigkeit und den vertikalen elektrischen Leitungsstrom Luft-Erde. Besonders einfach gestaltet sich die Messung dieser drei luftelektrischen Elemente nach der Methode von C. T. R. Wilson [1]). Hienach können diese drei Werte mit ein und demselben Apparate in kurzer Zeit und mit großer Genauigkeit in absolutem Maße ermittelt werden, wofern man nur ein Meßinstrument von genügender Empfindlichkeit verwendet. Als solches hat sich bei meinen Messungen das Saitenelektrometer als ganz besonders geeignet erwiesen. Es sei daher im folgenden der von mir konstruierte Apparat, der im Prinzip dem Wilsonschen gleicht, näher beschrieben.

I. Apparat.

Das Instrument besteht im wesentlichen aus vier Teilen: einem Thomsonschen Schutzringkondensator *Sch* (Fig. 1), dem Wilsonschen „Kompensator" *Ko*, dem Saitenelektrometer *E* und einem Holzkasten *H*, der die Hilfsladung für das Elektrometer enthält und gleichzeitig dem ganzen Apparate

[1]) C. T. R. Wilson, Proceed. of the Cambridge Philos. Soc. Vol. 13, 184 und 363, 1905/06.

als Sockel dient. Die innere Einrichtung des Instrumentes ergibt sich aus der schematischen Zeichnung Figur 2. Der ganze Apparat ist aus Messing gearbeitet.

Der Schutzringkondensator *Sch* besteht aus einem breiten, ebenen Ring aus geschwärztem Messingblech von 400 mm äußerem, 115,8 mm innerem Durchmesser und 1 mm Dicke. Er wird von dem Gefäße *G* getragen. Letzteres sitzt auf dem 40 mm weiten Rohr *O*, das auf das Gehäuse des Saitenelektrometers *E* aufgeschraubt ist. Der Kopf des Elektrometers trägt den Stab *t*, an dessen oberem Ende eine geschwärzte, kreisrunde Messingplatte *P* befestigt ist, mit *Sch* in einer Ebene liegend. Diese „Empfangsplatte", wie ich sie im folgenden heißen will, steht also mit der Saite *S* in leitender Verbindung, ist aber vom Gehäuse des Elektrometers durch den Bernsteinstopfen *B* und vom Schutzring durch einen 2,9 mm breiten, kreisförmigen Spalt isoliert. Der Durchmesser der Empfangsplatte ist 110,0 mm, ihre Fläche, gemessen bis zur Mitte des Luftspaltes, 100,0 cm², wodurch die Berechnung der Messungen vereinfacht wird. Der abnehmbare Deckel *D* aus 0,5 mm dickem, geschwärzten Messingblech steht in einer kreisförmigen Einkerbung des Schutzringes, wodurch eine stets gleiche Lage, zentrisch zur Empfangsplatte, gesichert wird. Dem Schutzringe *Sch* wurde absichtlich der große Durchmesser von 400 mm gegeben, weil sich herausstellte, daß bei schmäleren Schutzringen jede Handbewegung des Beobachters bei der großen Empfindlichkeit des Elektrometers eine kleine Veränderung des Saitenausschlages durch Influenzwirkung hervorbrachte.

Mit dem Stabe *t* ist der senkrecht abstehende Kondensatorstift *st* verbunden, der die innere Belegung eines verschiebbaren Zylinderkondensators *Ko* bildet. Die äußere Belegung bildet ein 10 mm weites Messingröhrchen *r*, das in dem Hartgummistopfen *h* zentrisch zum Rohre *Ko* gelagert ist. Das Rohr *Ko* gleitet im Rohre *R* und ist mittels Zahnstange und Trieb verschiebbar. Die Größe der Verschiebung wird an der in 100 Teile geteilten Trommel *T* (Fig. 1) abgelesen. Durch eine, das Rohr *Ko* frei durchsetzende Sonde *S*

kann r an die Ladebatterie KB angeschlossen und somit dauernd auf ein bestimmtes Potential geladen werden. Beim Hineinschieben influenziert also das geladene Kondensatorröhrchen r auf dem ungeladenen Stifte st eine bestimmte Elektrizitätsmenge, oder bindet, kompensiert eine bereits vorhandene Ladung entgegengesetzten Vorzeichens, weshalb diese Vorrichtung von Wilson „Kompensator" genannt wurde. Gegenüber von st ist der federnd bewegliche Erdleitungsstift e angebracht, der, bis zur Berührung mit dem Träger t hineingedrückt, das Elektrometer (Empfangsplatte, Kondensatorstift und Saite) zur Erde ableitet.

Die in den letzten Jahren gesammelten Erfahrungen und Anregungen führten mich zu weiteren Verbesserungen der Konstruktion des Saitenelektrometers. Eine genaue Beschreibung der neuen Form dieses Instrumentes erscheint demnächst in der Physikalischen Zeitschrift. Hier genügt es, lediglich die für die vorliegende Anwendung wichtigen Konstruktionsänderungen zu erwähnen. Die beiden Schneiden J und A des Elektrometers (Fig. 2) sind nunmehr gemeinsam auf einem Schlitten angeordnet, welcher durch zwei Mikrometerschrauben von außen seitlich verschoben werden kann. In Figur 1 ist nur die rechte Schraube s_r sichtbar. Durch entsprechende Verschiebung der beiden Schneiden relativ zur feststehenden Saite behält diese, auch nach Anlegung der Hilfsladung an die Schneiden, dieselbe Nullstellung bei, wie bei ungeladenen Schneiden. Auf diese Weise wird, bei gleich großen Saitenausschlägen nach links und rechts, die größtmögliche Empfindlichkeit erzielt, wenn die Saite bis nahe an die labile Gleichgewichtslage heran entspannt wird. Eine weitere Empfindlichkeitssteigerung gegenüber der alten Form des Saitenelektrometers konnte durch Verwendung von Zeißscher Optik erzielt werden. Als besonders geeignet hat sich das Achromatobjektiv A von 9 mm freiem Objektabstand in Verbindung mit dem orthoskopischen Okular $f = 9$ mm erwiesen. Das verhältnismäßig weit von der Saite abstehende Objektiv bringt keine bemerkbare Störung des elektrischen Feldes zwischen

den beiden geladenen Schneiden hervor, gibt aber doch mit dem stark vergrößernden Okular (mit Mikrometer) eine genügende, 284 malige Vergrößerung.

Als Hilfsladung haben sich zwei hintereinander geschaltete Krügerbatterien[1]) *KB* (Fig. 2), deren Verbindungsstelle (Mitte) geerdet ist (Kontakte 00 in Fig. 1), bestens bewährt. Die beiden Batterien sind in dem Holzkasten *H*, $27 \times 20 \times 9$ cm, untergebracht, der zur Vermeidung von reibungselektrischen Störungen mit einer geerdeten Blechumhüllung versehen ist. Von den Batterien führen, außer den beiden Erdleitungssonden, noch vier Stecksonden durch Löcher im Kastendeckel nach oben. Zwei von den Endklemmen ausgehende Sonden dienen zur Aufladung der Elektrometerschneiden auf $\pm$ 100 Volt, zwei andere zur Ladung des Kompensators auf — 30 Volt oder + 30 Volt, je nachdem bei den noch zu besprechenden Messungen + oder — Potentialgefälle in der Atmosphäre besteht. Der Wechsel der Kompensatorladung geschieht in einfachster Weise durch Umstecken des Zuleitungsdrahtes zum Kompensator (Sonde mit Hartgummigriff) vom Kontakt — 30 Volt nach + 30 Volt. Hierin liegt ein Vorzug der Ladebatterie gegenüber der Wilsonschen Quarz-Leydenerflasche, bei der ein rasches Umladen im Freien recht beschwerlich, wenn nicht mitunter unmöglich ist, und wo zu dem bei jeder Umladung auch eine Änderung der Kompensatoreichkurve eintritt. Das alles fällt bei den Krügerbatterien weg. Ihre E. M. K. wurde oftmals durch ein genau geeichtes Saitenelektrometer in Doppelschaltung geprüft. Sie erhielt sich nunmehr durch zwei Jahre hindurch völlig konstant, so daß die Eichkurve des Kompensators stets die gleiche blieb. Hiemit ist ein weiterer Vorteil bei Verwendung von Batterien statt einer Leydenerflasche verbunden. Die völlig konstante Kompensatorladung macht die bei Wilson notwendige Nachprüfung des Kompensatorpotentiales vor und nach jeder Messung überflüssig.

---

[1]) F. Krüger, Physikal. Zeitschr. 7, 182, 1906.

Bei Nichtgebrauch des Instrumentes werden die Sonden abgezogen und die Löcher im Kasten durch Steckdeckel (Fig. 1) luft- und staubdicht verschlossen.

Der eben beschriebene Apparat wurde vom Phys.-mechan. Institut Prof. Dr. M. Th. Edelmann & Sohn in mustergültiger Weise ausgeführt. Bei den Vorversuchen und der schließlichen Ausführung dieses Apparates hat sich die genannte Firma durch ihre sachkundige Mitarbeit sehr verdient gemacht.

Eichung des Kompensators.

Das Instrument, das zur Messung kleiner Elektrizitätsmengen dienen soll, muß empirisch geeicht werden. Die Eichung habe ich, etwas abweichend von Wilson, in folgender Weise vorgenommen (siehe Schaltungsanordnung Fig. 3). Auf den Schutzring *Sch* des Elektrometers werden drei, je 10,0 mm hohe Hartgummisäulchen *h* aufgestellt, die durch Abflammen von jeder etwa anhaftenden elektrischen Ladung vorher befreit worden sind. Diese drei Säulchen tragen eine völlig ebene Aluminiumscheibe *Al* vom Durchmesser des Schutzringes. Durch Abzweigen von einem großen Widerstande *W* zwischen den Klemmen eines Akkumulators *Ak* kann die Aluminiumscheibe in bekannter Weise auf Potentiale zwischen 0 und 2 Volt aufgeladen werden. Die Klemmspannung des Akkumulators wird durch ein dauernd angeschaltetes Präzisionsvoltmeter auf 1/100 Volt genau abgelesen. Beim Öffnen des Stromschlüssels *S* wird die Zuleitung zum Akkumulator unterbrochen und gleichzeitig die Aluminiumscheibe geerdet.

Bei der Eichung des Kompensators wird die Aluminiumscheibe auf das Potential $V = +0{,}50$ Volt geladen. Auf der Empfangsplatte *P* wird hiedurch eine bestimmte und berechenbare negative Elektrizitätsmenge $-Q$ gebunden, eine ebenso große Menge positiver Elektrizität $+Q$ frei. Der von letzterer bewirkte Elektrometerausschlag wird durch Verschiebung des auf -30 Volt geladenen Kompensators rückgängig gemacht, so daß die Saite wieder genau auf 0 einsteht. Jetzt wird durch Öffnen des Schlüssels *S* die Aluminiumplatte entladen

und die frei gewordene Influenzelektrizität erster Art mittels des Erdleitungsstiftes e (Fig. 2) abgeleitet. Durch wiederholte Ladung der Aluminiumplatte und entsprechendes Vorwärtsschieben des Kompensators erhält man weitere Kompensatoreinstellungen, die zur Bindung der doppelten, dreifachen etc. Elektrizitätsmenge Q notwendig sind. Zu jedem Q, $2\,Q$, $3\,Q$ etc. ergibt sich also je eine Kompensatorablesung, und aus den zusammengehörigen Wertepaaren läßt sich die in Figur 4 gezeichnete Eichkurve entwerfen. Um den Einfluß von Einstellungs- und Ablesefehlern, sowie die Wirkung von etwaigen Unebenheiten der Aluminiumplatte möglichst zu vermindern, habe ich die Eichung des Kompensators stets doppelt durchgeführt, wobei zuerst die eine und dann die andere Seite der Aluminiumscheibe der Empfangsplatte zugewendet war und das Mittel der so erhaltenen je zwei Kompensatorablesungen gebildet. Meist stimmten die zusammengehörigen Werte völlig miteinander überein.

Die auf der Empfangsplatte influenzierte Elektrizitätsmenge Q berechnet sich aus der Formel für den Thomsonschen Schutzringkondensator folgenderweise:

$$Q = \frac{F \cdot V}{4\,\pi\,d} \cdot \frac{1}{300}\ E.\,S.\,E.$$

wobei:

F = Fläche der Empfangsplatte = 100,0 cm² (s. S. 330),
V = Potential der Aluminiumplatte = 0,50 Volt,
d = Abstand der Al-Platte von der Empfangsplatte = 1,00 cm ist,

also:

$$Q = \frac{100{,}0 \cdot 0{,}50}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 300} = 1{,}33 \cdot 10^{-2}\ E.\,S.\,E.$$

Dieser Elektrizitätsmenge von $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ $E.S.E.$ entspricht eine Kompensatorverschiebung von 19,0 Ko-Skt. Einer Verschiebung von 0,1 Ko-Skt. entspricht also eine Elektrizitätsmenge von $7{,}0 \cdot 10^{-5}$ $E.\,S.\,E.$, und es ist zu überlegen, ob diese kleine Elektrizitätsmenge auch wirklich meßbar ist. Die Empfindlichkeit des Kompensators ist in erster Annäherung

proportional seiner Ladung und der Dicke des Kompensatorstiftes. Man bräuchte daher nur die Ladung recht klein und den Stift recht dünn zu wählen, um selbst bei kleinen Elektrizitätsmengen auf der Empfangsplatte noch große Kompensatorverschiebungen zu erhalten. Dem setzt aber die Empfindlichkeit des Elektrometers bald eine Grenze. Sie bestimmt vor allem die Ablesegenauigkeit und damit die erreichbare Empfindlichkeit des Kompensators. Bei dem erwähnten Saitenelektrometer neuer Konstruktion gibt, bei geeigneter Saitenspannung, 0,001 Volt noch 0,1 Mikrometerteile Ausschlag. Da nun die Kapazität des ganzen Apparates, deren Messung sogleich besprochen wird, $C = 16{,}0$ cm ist, so beträgt die kleinste noch meßbare Elektrizitätsmenge $= 16{,}0 \cdot \frac{0{,}001}{300} = 5{,}3 \cdot 10^{-5}$ *E. S. E.* Der Kompensator wurde nun so dimensioniert, daß diese kleinste Elektrizitätsmenge von $5{,}3 \cdot 10^{-5}$ *E. S. E.* durch eine Verschiebung des Kompensatorrohres um nicht mehr als 0,1 Skalenteile gebunden wird. Tatsächlich beträgt die angewandte Empfindlichkeit des Kompensators, wie erwähnt, 0,1 Ko-Skt. $= 7{,}0 \cdot 10^{-5}$ *E. S. E.*, sie liegt also noch etwas unter der erreichbaren Grenze. Mit Hilfe der in Figur 3 skizzierten Schaltungsanordnung läßt sich die Empfindlichkeit des Kompensators durch Aufladung der Aluminiumscheibe auf ein entsprechend niederes Potential auch direkt messen. Es ergab sich bei meinem Apparat auch auf diese Weise die eben angegebene Größe.

Für die Form des Kompensatorstiftes ist aber noch ein weiterer Umstand maßgebend. Die durch das Erdfeld auf der Empfangsplatte influenzierte Elektrizitätsmenge ist nicht selten 20mal so groß, als die während 5 Minuten durch den Ionenstrom abgegebene. Um auch diese großen, namentlich im Winter oder bei Bodennebel, bestehenden Oberflächendichten noch messen zu können, ohne die Empfindlichkeit des Kompensators für kleine Elektrizitätsmengen zu vermindern, habe ich das am Träger *t* (Fig. 1) liegende Ende des Kompensatorstiftes *st* dicker gehalten und so ein steiles Ansteigen der Kompensatorkurve

bei Verschiebung über 115 Skalenteile hinaus erreicht (Fig. 4). Zur Auswertung des weitaus größten Teiles aller Messungen reicht das geradlinig verlaufende erste Stück der Eichkurve hin. Nur bei besonders hohen Werten der Oberflächendichte ist der obere Teil der Eichkurve, vom eingezeichneten Punkte ab, zu verwenden, wobei ungefähr dieselbe relative Genauigkeit bei der Auswertung erreicht wird.

Bei der Messung der Gesamtkapazität des Apparates mußte ich etwas anders verfahren als Wilson, um die Kontaktpotentialdifferenz zwischen Aluminiumscheibe *Al* (Fig. 2) und Messingempfangsplatte *P*, die bei der großen Empfindlichkeit des Saitenelektrometers störend wirkte, unschädlich zu machen. Mittels der Schaltungsanordnung (Fig. 3) wird das Elektrometer, nach Entfernung der Aluminiumscheibe, in Volt geeicht. An Stelle des einfachen Stromschlüssels *S* wird jetzt zweckmäßiger ein Kommutator verwendet, um Saitenausschläge nach links und rechts zu erhalten. Nach dieser Eichung wird die Aluminiumplatte wieder auf ihre Hartgummisäulchen gelegt und auf ein bestimmtes Potential *V* aufgeladen. Durch Einwärtsschieben des Kompensators, dessen Skala für diese Messung nicht geeicht zu sein braucht, wird die Influenzelektrizität II. Art gebunden. Nun wird die Aluminiumscheibe abgehoben, dafür der Deckel über die Empfangsplatte gestülpt und die nun frei gewordene Influenzelektrizität I. Art durch Einwärtsdrücken des Erdleitungsstiftes *e* (Fig. 2) abgeleitet. Zieht man nunmehr den Kompensator wieder ganz aus, so bewirkt die jetzt freiwerdende Influenzelektrizität II. Art von der Menge Q *E. S. E.* einen Saitenausschlag, dessen Voltwert v der zu zeichnenden Volt-Eichkurve entnommen wird. Aus V und v in Volt berechnet sich die Kapazität C zu:

$$C = \frac{Q}{v} \cdot 300$$

$$= \frac{F \cdot V}{4 \pi d \cdot v} \text{ cm},$$

wobei für F und d die Seite 334 angegebenen Werte einzusetzen sind. Für den vorbeschriebenen Apparat ist, bei völlig ausgezogenem Kompensator, die Gesamtkapazität $C = 16{,}0$ cm.

Es dürfte nicht ohne Interesse sein, die eben angeführten Konstanten denen des Wilsonschen Apparates gegenüberzustellen. C. T. R. Wilson[1]) gibt für seinen zweiten, verbesserten Apparat folgende Werte an:

Empfindlichkeit des Goldblattelektrometers

2 Okul. T. = 1 Volt, also 0,1 Ok. T. = 0,05 Volt = v.

Kapazität des Apparates $C = 15{,}2$ cm, also kleinste meßbare Elektrizitätsmenge

$$q = C \cdot v = 15{,}2 \cdot \frac{0{,}05}{300} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ E.S.E.$$

Oberfläche der Empfangsplatte $F = 41{,}3$ cm², also kleinste meßbare Elektrizitätsmenge pro cm² der Empfangsplatte

$$q_0 = \frac{q}{F} = \frac{2{,}5 \cdot 10^{-3}}{41{,}3} = 6{,}0 \cdot 10^{-5}\ \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}.$$

Bei dem oben beschriebenen Apparat sind die entsprechenden Größen

$v = 0{,}001$ Volt, Empfindlichkeit des Saitenelektrometers.
$C = 16{,}0$ cm, Gesamtkapazität.
$q = 7{,}0 \cdot 10^{-5}\ E.S.E.$, kleinste, meßbare Elektrizitätsmenge.
$F = 100{,}0$ cm², Oberfläche der Empfangsplatte.
$q_0 = 7{,}0 \cdot 10^{-7}\ \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$, kleinste Elektrizitätsmenge pro cm² der Empfangsplatte.

Mit diesem Apparat läßt sich also eine pro cm² einwandernde, oder dort influenzierte Elektrizitätsmenge feststellen, die fast 100 mal kleiner ist als die vom Wilsonschen Instrumente noch meßbare. Diese große Empfindlichkeit des Elektrometers ist auch für die hier angeführten Messungen keineswegs über-

[1]) C. T. R. Wilson, Proc. of the Roy. Soc. A Vol. 80, 539, 1908.

flüssig. Waren doch bei meinen Beobachtungen im Jahre 1909 nicht selten Elektrizitätsmengen von $2 \cdot 10^{-5} \frac{E.S.E.}{cm^2}$ zu messen, und einigemale traten sogar noch kleinere Ladungen der Empfangsplatte durch den Ionenstrom bei 5 min Expositionszeit auf. Aber selbst diese kleinen Ladungsmengen, die weit unter dem Jahresmittel von $1{,}36 \cdot 10^{-4} \frac{E.S.E.}{cm^2}$ liegen, lassen sich also noch mit hinreichender Genauigkeit (ca. 3 %) messen.

Hierin dürfte sich deutlich die große Überlegenheit des Saitenelektrometers neuer Form, selbst über das so empfindliche Wilsonsche Einblattelektrometer aussprechen, wobei noch als weiterer Vorzug hinzukommt, daß der äußerst dünnen und elastischen Saite all die bekannten Mängel des Blättchens nicht anhaften. So wird das Saitenelektrometer, gerade in Verbindung mit dem Wilsonschen Kompensator, der sich zur direkten Messung kleiner Elektrizitätsmengen ausgezeichnet bewährt hat, auch zu mancherlei anderen elektrostatischen Untersuchungen mit Vorteil verwendet werden können. Hiebei kommt noch in Betracht, daß die Wilsonsche Methode eine Nullmethode ist, und daß daher kleinere Mängel der Isolation der mit dem Elektrometer verbundenen Apparatteile keine beträchtlichen Fehler bewirken. Für die Isolatoren des Elektrometers selbst wird ausschließlich der vorzüglich isolierende echte Bernstein verwendet.

Handhabung des Apparates.

Bei den nachstehend angeführten Messungen wurde stets in folgender Weise verfahren. Der Apparat wurde im Garten der Sternwarte ca. 16 m westlich von dem S. 306 erwähnten Stationsgebäude auf einer Holzbank von solcher Höhe aufgestellt, daß sich das Ablesemikroskop gerade in Augenhöhe befand. Die Ebene des Schutzringes und der Empfangsplatte lag dann 183 cm über dem Boden. In nächster Umgebung des Apparates befanden sich Bäume, so daß das Erdfeld am Orte der Beobachtungen keineswegs ungestört war, ein Um-

stand, der bei der Reduktion der Messungen wohl zu berücksichtigen ist. Die Entfernung des Instrumentes vom Poloniumkollektor des selbstregistrierenden Benndorfschen Elektrometers betrug 21 m. Zudem lag zwischen dem an der Ostwand angebrachten Kollektor und dem Beobachtungsplatze im Westen das Stationsgebäude, so daß eine Beeinflussung der Ionenstrommessungen durch ionisierte Luft aus der Umgebung des Kollektors nicht zu befürchten war.

Bestand zwischen dem Aufbewahrungsorte des Apparates, dem geheizten Arbeitszimmer, und der freien Atmosphäre eine erhebliche Temperaturdifferenz, so wurde das Instrument mindestens $^1/_4$ Stunde vor Beginn der Messungen ins Freie getragen, damit alle seine Teile die Temperatur der umgebenden Luft annehmen konnten. Es zeigte sich nämlich im Winter, daß, unmittelbar nach dem Verbringen des Apparates in die kalte Außenluft, das anfangs scharf eingestellte Saitenbild völlig unscharf wurde, nach kurzer Zeit aber seine ursprüngliche Schärfe wieder erlangte. Dies rührt von der verschiedenen Wärmekapazität der Saite mit Empfangsplatte und des von ihr durch Bernstein isolierten Elektrometergehäuses her, weshalb der Wärmeausgleich dieser Teile mit der Umgebung nicht gleich schnell vor sich geht. Erst wenn Saite und Gehäuse dieselbe Temperatur angenommen haben, wirkt die sorgfältig geprüfte Temperaturkompensation in richtiger Weise, was durch wiederholte Versuche bestätigt werden konnte.

Die Messungen selbst werden am besten in folgender von C. T. R. Wilson eingeführten Reihenfolge vorgenommen:

1. Das Elektrometergehäuse wird an die Erdleitung angelegt, Elektrometer und Empfangsplatte mittels des Erdungsstiftes geerdet.

2. Zu Beginn einer ganzen Minute wird der Elektrometerdeckel abgehoben. Bei normalem elektrischen Erdfelde wird auf der Empfangsplatte eine bestimmte — Elektrizitätsmenge $-Q$ durch Influenz gebunden, eine ebensogroße + Elektrizitätsmenge $+Q$ frei. Letztere bewirkt einen Ausschlag der

Saite, der durch entsprechende Verschiebung des — geladenen Kompensators auf 0 zurückgebracht wird. Die Ablesung an der Kompensatortrommel wird notiert und ergibt mit Hilfe der Eichkurve (Fig. 4) die Gesamtoberflächenladung der Empfangsplatte.

3. Das Elektrometer wird 5 min sich selbst überlassen. Die Saitenausschläge, die während dieser Zeit durch Veränderungen des Potentialgefälles und durch die Ladungsabgabe der einwandernden + Ionen entstehen, werden durch entsprechende Verschiebungen des Kompensators fortwährend rückgängig gemacht, so daß dauernd die Saite in ihrer Nullstellung und damit die Empfangsplatte auf dem Potentiale 0 (Potential der Erdoberfläche) erhalten bleibt.

4. Nach Ablauf der 5 min wird der Elektrometerdeckel wieder aufgesetzt, und der Kompensator völlig ausgezogen. Die durch Influenz getrennten Elektrizitätsmengen vereinigen sich jetzt wieder, und es bleibt im Elektrometer lediglich die von den + Ionen an die Empfangsplatte übertragene + Ladung zurück. Der hiedurch verbleibende Saitenausschlag wird durch neuerliche Verschiebung des Kompensators wieder auf 0 zurückgeführt und die Kompensatorablesung notiert. Aus der Eichkurve läßt sich jetzt die Elektrizitätsmenge q in $E.S.E.$ entnehmen, welche in 5 min in Form von Ionenladungen an die Empfangsplatte abgegeben wurde.

5. Der Kompensator wird wieder ganz ausgezogen, das Elektrometer geerdet und die Messung 2 wiederholt.

Die Berechnung der Beobachtungen ist eine sehr einfache. Die aus Messung 2 und 5 erhaltenen Ladungen der Empfangsplatte werden zu einem Mittelwert vereinigt. Durch Division mit der Oberfläche der Empfangsplatte $F = 100{,}0\ \mathrm{cm}^2$ ergibt sich die elektrische Oberflächendichte σ in $\frac{E.S.E.}{\mathrm{cm}^2}$.

Aus Messung 3 berechnet sich der Ionenstrom i_+ in $\frac{\mathrm{Amp.}}{\mathrm{cm}^2}$ folgenderweise:

F = Oberfläche der Empfangsplatte = 100,0 cm².
t = Expositionszeit in min = 5 min.
q = eingewanderte + Elektrizitätsmenge während 5 min in $E.S.E.$
1 Amp. = $3 \cdot 10^9$ $E.S.E.$

$$i = \frac{q}{F \cdot t} \cdot \frac{1}{60 \cdot 3 \cdot 10^9} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2},$$

$$i = \frac{q}{100 \cdot 5 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 10^9} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}.$$

Aus der Oberflächendichte σ kann das Potentialgefälle $\frac{dV}{dh}$, das unmittelbar über der Empfangsplatte herrschte, berechnet werden. Es gilt hier die Coulombsche Beziehung

$$\frac{dV}{dh} = -4\pi\sigma.$$

Wird das Potentialgefälle, wie üblich, in $\frac{\text{Volt}}{\text{m}}$, die Dichte in $\frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$ ausgedrückt, so ist, da 1 $E.S.E.$ = 300 Volt

$$\frac{dV}{dh} = -300 \cdot 100 \cdot 4\pi\sigma \frac{\text{Volt}}{\text{m}}.$$

Zwischen Ionenstrom i_+ und Potentialgefälle $\frac{dV}{dh}$ besteht die Beziehung

$$i_+ = \lambda_+ \cdot \frac{dV}{dh}$$

und hieraus berechnet sich, wie S. 342 noch näher erörtert wird, die polare positive Leitfähigkeit λ_+

$$\lambda_+ = \frac{i_+}{\frac{dV}{dh}}.$$

Um die Leitfähigkeit λ_+ in $E.S.E.$ zu erhalten, ist i_+ jetzt in $\frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$ und ebenso $\frac{dV}{dh}$ in $\frac{E.S.E.}{\text{cm}}$ auszudrücken. Ersterer Wert berechnet sich aus der Messung 3 zu

$$i_+ = \frac{q}{F \cdot t} \cdot \frac{1}{60} \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$$

und

$$\frac{dV}{dh} = -4\pi\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}},$$

also

$$\lambda_+ = \frac{q}{F \cdot t \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 60} E.S.E.$$

Mit dem Wilsonschen Apparate lassen sich also vier der wichtigsten luftelektrischen Elemente, nämlich die Oberflächendichte σ, das Potentialgefälle $\frac{dV}{dh}$, der vertikale positive Leitungsstrom i_+ und die polare positive Leitfähigkeit λ_+ in absolutem Maße bestimmen. Die Zeitdauer einer vollständigen Messung beträgt ca. 7 min.

Die so gewonnenen Zahlen für i_+ und λ_+ sind aber nicht ohne weiteres vergleichbar mit den Werten, die nach anderen Methoden, etwa der Ebert-Macheschen, der Gerdienschen oder Scheringschen Methode der Leitfähigkeitsmessung erhalten wurden. Eine solch direkte Vergleichung, wie sie bisher stets vorgenommen wurde, ist meines Erachtens unrichtig und zwar aus folgenden Gründen. Nach der Ionentheorie setzt sich das Gesamtleitvermögen der Luft λ aus zwei Summanden λ_+ und λ_- zusammen. $\lambda_+ = \varepsilon \cdot v_+ \cdot n_+$ ist die Leitfähigkeit für die positiven Ionen, also das polare positive Leitvermögen, $\lambda_- = \varepsilon \cdot v_- \cdot n_-$ ist die Leitfähigkeit für die negativen Ionen, das polare negative Leitvermögen. Die Gesamtleitfähigkeit λ ist also

$$\lambda = \lambda_+ + \lambda_- = \varepsilon (v_+ n_+ + v_- n_-).$$

Bei den erwähnten drei Methoden werden die polaren Leitfähigkeiten λ_+ und λ_- gesondert bestimmt und durch Summation das Gesamtleitvermögen λ ermittelt. Bei der Wilsonschen Methode liegen nun die Verhältnisse ganz anders. Hier wird nicht die Leitfähigkeit, sondern der Leitungsstrom direkt gemessen. Unter der Wirkung des normalen elektrischen Erdfeldes wandern + Ionen zur Erde, — Ionen nach oben, bis

sie von Staubkernen oder Kondensationsprodukten absorbiert werden. Lediglich die abwärts wandernden + Ionen gelangen zur Empfangsplatte des Wilsonschen Apparates. Es wird also nur die eine Komponente i_+ des vertikalen Leitungsstromes gemessen, während der Gesamtleitungsstrom $i = i_+ + i_-$ ist. Der aus i_+ berechnete Wert für die Leitfähigkeit gibt demnach nur den Anteil der + Ionen am Gesamtleitvermögen, also das polare positive Leitvermögen λ_+. Es ist, wie S. 341 angegeben $\lambda_+ = \frac{i_+}{\frac{dV}{dh}}$. Da nun in erster Annäherung für die erdnahen Luftschichten $\lambda_+ = \lambda_-$ ist[1]), so sind die nach Wilson erhaltenen Werte für die Leitfähigkeit (λ_+) und für den Ionenstrom (i_+) zu verdoppeln, um sie mit den nach anderen Methoden erhaltenen Werten (λ) vergleichbar zu machen.

Weiter ist der Einfluß zu berücksichtigen, den die Aufstellungsweise des Apparates auf die Meßergebnisse ausübt. Bei der Aspirationsmethode wurde zumeist der Apparat in richtiger Weise an Orten aufgestellt, die vor dem Erdfelde geschützt waren und doch der freien Luft allseitigen Zutritt ermöglichten. Beim Wilsonschen Apparate wäre die ideale Aufstellung die, bei welcher Instrument und Beobachter derart in einer Grube, mitten im freien ebenen Gelände versenkt wären, so daß nur die Empfangsplatte mit ihrem Schutzringe in der Höhe der Erdoberfläche läge. Eine solche Aufstellungsart wird sich aber nur in den wenigsten Fällen verwirklichen lassen. Wird der Wilsonsche Apparat an einem beliebigen Ort, möglichst bequem aufgestellt, wie dies auch bei den vorliegenden Messungen geschehen ist, so sind die dort erhaltenen Werte für σ und i_+ auf die freie Ebene zu reduzieren. Falls der Beobachtungsplatz ohnehin schon eine möglichst große ebene Fläche bildet, kann man sich der von C. T. R. Wilson[2])

---

[1]) H. Gerdien, Nachr. d. K. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Kl. S. 85, 1907. — H. Ebert und K. Kurz, Abhandlung d. K. Bayer. Akad. d. Wiss., math.-phys. Kl. 25, 2 Abh., S. 54, 1909.

[2]) C. T. R. Wilson, Proc. of the Roy. Soc. (A) 80, 543, 1908.

angegebenen Methode bedienen. Bei jeder anderen Gestalt des Beobachtungsortes werden Simultanmessungen des Potentialgefälles durch einen zweiten Beobachter in der S. 311 beschriebenen Weise notwendig. Bei meinen Messungen wurde die Reduktionskonstante so ermittelt, daß die nach Wilson gemessenen Werte des Potentialgradienten mit den gleichzeitig vom Benndorfschen Apparat aufgezeichneten Gefällswerten verglichen wurden, welch letztere ja bereits auf die Ebene reduziert sind. Die Gegenüberstellung der nach ganz verschiedenen Methoden zu gleichen Zeiten gefundenen Werte für das Potentialgefälle ergab einen vollkommenen Parallelismus. Als Mittel aus 300 Vergleichungen ergab sich für den nach Wilson gemessenen Potentialgradienten der Reduktionsfaktor 0,60, d. h. die 182 cm über dem Boden im Garten gemessenen Potentialgefälle sind mit 0,60 zu multiplizieren, um die gleichzeitig über der freien Ebene bestehenden Gefällswerte zu erhalten. Macht man nun die, bei einigermaßen günstigem Wetter sicher zutreffende Annahme, daß die Leitfähigkeit der Luft im Garten dieselbe ist, wie über dem benachbarten freien Felde, so sind nach der Beziehung $i_+ = \lambda_+ \cdot \frac{dV}{dh}$ auch die Zahlen für den Ionenstrom i_+ mit 0,60 zu multiplizieren, um sie auf die Ebene zu reduzieren. Erst die so reduzierten Werte von i_+ sind mit jenen vergleichbar, die mit dem Wilsonschen Apparate von anderen Beobachtern und anderen Orten gefunden wurden, und die nach dem Vorgange von Wilson ebenfalls auf die Ebene reduziert sind. Alle reduzierten Werte i_+ und λ_+ sind weiter, wie oben ausgeführt, noch mit zwei zu multiplizieren, um sie mit jenen Absolutwerten vergleichbar zu machen, die nach den anderen Methoden erhalten wurden.

II. Messungsergebnisse.

Die Messungen der elektrischen Oberflächendichte σ und des vertikalen Leitungsstromes i_+ erstrecken sich über ein Jahr, von Januar bis Dezember 1909. Sie wurden täglich in der Zeit zwischen $^1/_2 12^h$ und 12^h mittags angestellt, wenn

nicht gerade zu dieser Zeit Niederschläge fielen. Im Ganzen konnte an 175 Tagen beobachtet werden. Zumeist wurden für σ und i_+ unmittelbar hintereinander zwei Messungen in der Seite 339 beschriebenen Weise angestellt und das Mittel der so gewonnenen Werte gebildet. Zur Kontrolle wurde wöchentlich einmal der Kompensator nachgeeicht und die E. M. K. der Krügerbatterien gemessen. Das Ergebnis war stets befriedigend. Ebenso zeigten die Isolatoren des Elektrometers und des Kompensators, die anfangs täglich geprüft wurden, ein dauernd vorzügliches Isolationsvermögen, trotz des starken Temperaturwechsels dem das Instrument bei den Winterbeobachtungen täglich unterworfen war.

Da mit der hiesigen Sternwarte eine meteorologische Station II. Ordnung verbunden ist, konnten unmittelbar nach den luftelektrischen Messungen auch die meteorologischen Daten bestimmt werden.

1. Absolutwerte.

In Tabelle 1 sind die Monatsmittel der luftelektrischen Elemente σ, i_+, $\frac{dV}{dh}$ und λ_+ aus allen 175 Beobachtungstagen eingetragen, wie sie sich aus meinen Messungen durch Mittelbildung ergaben. Diese und die Werte der folgenden Tabellen 1—11 sind also nicht auf die Ebene reduziert.

In Tabelle 2 habe ich, entsprechend dem beim Potentialgefälle eingeschlagenen Verfahren (s. S. 314) die Monatsmittel nur aus den normalen (heiteren) Tagen berechnet. Reduziert man diese Werte auf die Ebene, so ergeben sich als Mittelwerte für das Beobachtungsjahr 1909 folgende Zahlen

Gesamtleitungsstrom

$$i = 2 \cdot 0{,}6\, i_+ = 2 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}70 \cdot 10^{-16} = 2{,}04 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2},$$

Gesamtleitfähigkeit

$$\lambda = 2 \cdot \lambda_+ = 2 \cdot 4{,}88 \cdot 10^{-5} = 0{,}976 \cdot 10^{-4}\ E.S.E.,$$

$$\text{Potentialgefälle (Ebene)}\ \frac{dV}{dh} = 0{,}6 \cdot 314 = 188 \frac{\text{Volt}}{\text{m}}.$$

Tabelle 1.

Monatsmittel aus allen Tagen.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Septemb.	Oktober	Novemb.	Dezemb.	Jahresmittel
$\sigma \frac{E.S.E.}{cm^2} \cdot 10^{-4}$	12,79	**13,62**	10,71	5,77	4,16	**3,98**	7,24	6,87	6,13	6,78	10,66	10,90	8,30
$i_+ \frac{Amp.}{cm^2} \cdot 10^{-16}$	2,07	**2,18**	1,46	1,18	1,44	1,07	**0,95**	1,42	1,61	1,29	1,30	2,12	1,51
$\frac{dV}{dh} \frac{Volt}{m}$	482	**514**	404	216	157	**150**	273	259	231	256	402	411	313
$\lambda_+ E.S.E. \cdot 10^{-5}$	3,87	3,82	3,26	4,89	**8,27**	6,42	3,14	4,94	6,29	4,54	**2,92**	4,65	4,34
Beobacht.-Tage	10	7	16	19	18	16	15	21	6	17	17	13	175

Tabelle 2.

Monatsmittel aus den normalen (heiteren) Tagen.

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Septemb.	Oktober	Novemb.	Dezemb.	Jahresmittel
$\sigma \frac{E.S.E.}{cm^2} \cdot 10^{-4}$	**13,09**	10,93	11,64	4,99	4,10	**3,97**	7,04	6,84	6,98	5,35	12,83	12,16	8,33
$i_+ \frac{Amp.}{cm^2} \cdot 10^{-16}$	**2,71**	2,18	1,73	1,47	1,51	1,15	**1,10**	1,49	2,02	1,31	1,60	2,17	1,70
$\frac{dV}{dh} \frac{Volt}{m}$	**493**	412	439	188	154	**150**	265	257	263	202	484	458	314
$\lambda_+ E.S.E. \cdot 10^{-5}$	4,95	4,76	3,55	7,05	**8,83**	6,92	3,74	5,21	6,92	5,85	**2,98**	4,26	4,88
Beobacht.-Tage	7	2	9	12	11	6	6	12	3	8	5	6	97

In Tabelle 3 sind die Münchner Werte mit den an anderen Orten erhaltenen zusammengestellt. Hierin sind die von C. T. R. Wilson, Carse und Mac Owan, sowie Simpson beobachteten Werte für i und λ entsprechend den Ausführungen S. 344 verdoppelt. Sie wurden von den genannten Beobachtern bereits selbst auf die Ebene reduziert.

Noch vor alle anderen Methoden zur Messung der Leitfähigkeit und des Ionenstromes ausgearbeitet waren, hat H. Ebert[1]) den vertikalen Leitungsstrom galvanometrisch gemessen und zu $2{,}2 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$ gefunden. Auch dieser Wert ist nur die + Komponente des Gesamtstromes und ist nicht auf die Ebene reduziert. Es scheint aber, daß sich bei der Ebertschen Meßanordnung die Seite 344 erwähnten Korrektionen in ihrer Wirkung auf den Absolutwert so ziemlich gegenseitig aufhoben, und daß der Wert $2{,}2 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$ den Betrag des Gesamtleitungsstromes in der Nähe Münchens richtig darstellt, in guter Übereinstimmung mit dem von mir gefundenen Mittelwert $2{,}0 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$.

Während also die übrigen luftelektrischen Elemente eine so große Veränderlichkeit mit Zeit und Ort aufweisen, daß man daran zweifeln könnte, bei ihnen auf einfache Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten zu stoßen, treffen wir im vertikalen Leitungsstrom ein Element von auffallender Konstanz an. Wie später gezeigt werden wird, ist besonders die Leitfähigkeit durch meteorologische Bedingungen, ferner durch Staub, Rauch und allerlei Zufälligkeiten beeinflußbar. Nahezu spiegelbildlich hiezu verlaufen die Variationen des Potentialgefälles. Der durch das Produkt beider bestimmte „normale vertikale Ionen-Leitungsstrom“ zeigt dagegen Schwankungen von viel geringeren Beträgen. Und zwar bezieht sich diese geringere Veränderlichkeit sowohl auf die zeitlichen Variationen am selben Beobachtungsorte, als namentlich auch

[1]) H. Ebert, Physikal. Zeitschr. 3, 338, 1901/2.

Tabelle 3.

Beobachter	Ort, Zeit	$i \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	λ E. S. E.	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	Methode
Gerdien [1] . .	Göttingen 1906	$2{,}66 \cdot 10^{-16}$	$2{,}27 \cdot 10^{-4}$	106	Gerdien
Wilson [2] . .	Peebles (Schottland) 1906/7	$2{,}24 \times 2 = 4{,}48 \cdot 10^{-16}$	$1{,}07 \times 2 = 2{,}14 \cdot 10^{-4}$	187	Wilson
Angenheister [3]	Samoa 1907/8	$2{,}14 \cdot 10^{-16}$	$5{,}0 \cdot 10^{-4}$	39	Gerdien
Simpson [4] . .	Simla (Indien) 1909	$1{,}8 \times 2 = 3{,}6 \cdot 10^{-16}$	$5{,}8 \times 2 = 11{,}6 \cdot 10^{-4}$	29	Simpson
Lutz	München 1909	$2{,}04 \cdot 10^{-16}$	$0{,}98 \cdot 10^{-4}$	188	Wilson
Kähler [5] . . .	Potsdam 1909/10	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$	$0{,}84 \cdot 10^{-4}$	260	Schering
Carse und Mac Owan [6]	Edinburgh 1909	$1{,}43 \times 2 = 2{,}86 \cdot 10^{-16}$	$0{,}36 \times 2 = 0{,}72 \cdot 10^{-4}$	357	Wilson
Ansel [3] . . .	Island 1910	$3{,}0 \cdot 10^{-16}$	$3{,}0 \cdot 10^{-4}$	90	Gerdien

[1] H. Gerdien, Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Kl. 1907, S. 84.
[2] C. T. R. Wilson, Proc. of the Roy. Soc. (A) **80**, 546, 1908.
[3] G. Angenheister, Abh. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Kl., Neue Folge **9**, Nr. 2, S. 20, 1911.
[4] G. C. Simpson, Phil. Mag. **19**, 723, 1910.
[5] K. Kähler, Veröff. d. K. Preuß. Meteorol. Instit., Nr. 223, S. XXX, 1910.
[6] G. A. Carse und D. Mac. Owan, Proc. of the Roy. Soc. of Edinburgh **30**, 460, 1909/10.

auf die Lokalvariationen. Auch sei hier daran erinnert, daß Ballonbeobachtungen auch auf eine große Konstanz in der Vertikalerstreckung des Stromes hindeuten[1]).

Die Tatsache, daß der vertikale Ionenstrom an so verschiedenartig und sogar in verschiedenen Zonen gelegenen Beobachtungsorten unter normalen Witterungsbedingungen doch nahezu dieselbe Intensität aufweist, macht wahrscheinlich, daß er allgemeinen geophysikalischen Bedingungen sein Entstehen verdankt, und daß gerade seine Verfolgung ein lohnendes Problem für ein weitausgedehntes Beobachtungsnetz, z. B. des geplanten der internationalen Assoziation der Akademien bilden würde, namentlich auch mit Rücksicht auf den möglichen Zusammenhang solcher elektrischer Ströme mit gewissen Variationen der erdmagnetischen Elemente. Faßt man alle Werte der Tabelle 3 zu einem Mittelwerte zusammen, so findet man die Intensität des gesamten Vertikalstromes zu $i = 2{,}87 \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$. Dies entspricht einem Einwandern von $\left(1{,}43 \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2} = \right) 15{,}5$ elektrostatischen positiven Mengeneinheiten pro m^2 und Stunde. Diese stetige Zuführung + Elektrizität müßte ein Ansteigen der absoluten Ladungshöhe des Erdkörpers bewirken. Alles deutet aber darauf hin, daß wir einen stationären Strömungszustand in dem System Luftmeer-Erde vor uns haben. Alsdann müssen aber dauernd Kompensationsvorgänge tätig sein, welche die in den Erdboden eingewanderte + Elektrizität durch die entsprechende — Elektrizität zu neutralisieren, oder mit anderen Worten + Elektrizität im Überschusse wieder in die Atmosphäre zurückzuführen im stande sind.

Ohne an dieser Stelle, an der zunächst nur Beobachtungstatsachen mitgeteilt werden sollen, näher auf diese wichtige Frage, die augenscheinlich an das Hauptproblem der luftelektrischen Forschung überhaupt rührt, einzugehen, sei in ihrem Zusammenhange nur folgendes erwähnt:

[1]) H. Gerdien, Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Kl., Heft 5, 1905.

a) die Messungen des Ionenstromes beziehen sich bei mir nur auf die Mittagsstunden, bei anderen Beobachtern zumeist auch nur auf einzelne Tagesstunden. Außerdem wurden durchwegs nur heitere, wenig bewölkte Tage mit positivem Potentialgefälle zur Mittelbildung mit herangezogen. Sicherlich aber stehen dem gegen den Erdboden gerichteten normalen positiven Leitungsstrome zu anderen Stunden oder bei anderer Wetterlage Ströme entgegengesetzter Richtung gegenüber, welche zur Aufrechterhaltung des stationären Zustandes mitwirken. In der Tat konnte ich bei negativem Gefälle einen entgegengesetzt verlaufenden Leitungsstrom von gleicher Größenordnung feststellen. Zu diesem Zwecke habe ich oftmals, wenn das selbstregistrierende Elektrometer negative Werte aufzuzeichnen begann, sogleich auch Messungen nach der Wilsonschen Methode vorgenommen. Freilich wurde diese Absicht nur zu oft durch die bald einsetzenden Niederschläge vereitelt. Trotzdem konnte an fünf Tagen mit Sicherheit festgestellt werden, daß bei negativem Potentialgefälle auch der Leitungsstrom seine Richtung umkehrt, und daß sich auch hier, je nach der Größe des eben bestehenden — Potentialgefälles und der Leitfähigkeit ähnliche Absolutwerte einstellten, wie bei normalem Gefälle.

Eine besonders interessante Beobachtung konnte ich am 24. September 1909 zwischen 4^h und 5^h p. m. machen. Zu dieser Zeit zog im unmittelbaren Alpenvorlande ein Gewitter mit heftigem Regen von W nach E. Der Donner war deutlich hörbar. Die Bewölkung am Südhimmel reichte höchstens 40^0 über den Horizont herauf. Der ganze übrige Teil des Himmels, also auch das Zenith war völlig wolkenlos. Trotzdem herrschte anfangs — Potentialgefälle und — Ionenstrom. Von 4^{07} bis 4^{12} p. m. wurde gemessen:

$$\frac{dV}{dh} = -222 \frac{\text{Volt}}{\text{m}} \text{ (auf die Ebene reduziert),}$$

$$i_- = 0{,}84 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2} \left(\text{Gesamtstrom } i = 1{,}68 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}\right),$$

$$\lambda_- = 3{,}41 \cdot 10^{-5} E.S.E. \text{(Gesamtleitfähigkeit } \lambda = 0{,}68 \cdot 10^{-4} E.S.E.)$$

Als bald darauf das Gewitter ungefähr die Höhe des Beobachtungsortes erreicht hatte, zeigte das Saitenelektrometer bei jedem Blitze einen plötzlichen bald +, bald — Ausschlag, der in ca. $^1/_4$ min wieder auf 0 zurückging. Unter der Wirkung des fortwährend von + nach — wechselnden Potentialgefälles fand keine Einwanderung von Ionen in die Empfangsplatte statt. Der vertikale Leitungsstrom blieb etwa $^1/_2$ Stunde lang 0, bis das Gewitter abgezogen war, trotzdem der Himmel über dem Beobachtungsorte dauernd unbedeckt blieb. Nach dem Gewitter wurden wieder normale Werte gefunden.

b) Die in der Tabelle 3, Seite 348, aufgeführten Beobachtungsorte sind ausgesprochene Landstationen. Bei ihnen kann + Elektrizität im Überschusse dem Luftmeere zugeführt, und dadurch der vertikale Ionenstrom wenigstens teilweise kompensiert werden. In diesem Sinne wirkt die, namentlich durch Luftdruckschwankungen, Bodenerwärmungen und Windstau unterstützte „Bodenatmung", die infolge der Diaphragmenwirkung der oberflächlichen Bodenschichten nach H. Ebert solche + Ladungen aus dem ionisierenden Erdreiche austreten läßt und — Elektrizität im Boden durch Adsorption zurückhält. Über die Größenordnung dieses Effektes geben die Versuche H. Eberts und K. Kurz[1]) Aufschluß. Hienach beträgt der im Boden zurückgehaltene Betrag an freier negativer Elektrizität (= austretender Überschuß an positiver Elektrizität) je nach der Beschaffenheit der obersten Bodenschichten 1 bis 2,5 *E. S. E.* pro m² und Stunde. Dieser Wert kann nach neueren und noch unveröffentlichten Versuchen H. Eberts unter Umständen auf 5 bis 6 *E. S. E.* pro m² und Stunde ansteigen, so daß also etwa $^1/_3$ der im Vertikalstrom einwandernden + Elektrizität, die im Mittel zu 15,5 *E. S. E.* pro m² und Stunde berechnet wurde, allein durch die Wirkung der Bodenatmung kompensiert wird. Zur Deckung des Restes müssen allerdings, außer dem erwähnten und nur zeitweise nach der Erdoberfläche hingerichteten — Ionenstrom noch andere Faktoren tätig sein.

[1]) H. Ebert und K. Kurz, Phys. Z. **11**, 398, 1910.

Auf dem Meere könnte die gesuchte Ionenproduktion durch Zerspritzen des See-(Salz-)Wassers bedingt sein, das nach Ph. Lenard dabei selbst negativ geladen zurückfällt und in die Luft positiv geladene Träger entsendet. Die positiven Ionen müßten dann durch Konvektionsströme der Luft nach oben hin entführt werden, wobei sich bei der dauernden Durchmischung der „Troposphäre" (untere Schicht bis zur oberen Inversion) schließlich ein angenähert stationärer Zustand herausbildet. Jedenfalls wäre, wie man sieht, die gleichzeitige Messung, oder besser noch eine fortlaufende Registrierung der Intensität des vertikalen Leitungsstromes an den verschiedensten Erdorten von größter Wichtigkeit.

2. Jährlicher Gang der luftelektrischen Elemente i_+, $\frac{dV}{dh}$ und λ_+.

Das Beobachtungsmaterial ist wohl zu spärlich, um daraus den jährlichen Gang der drei luftelektrischen Elemente i_+, $\frac{dV}{dh}$ und λ_+ deutlich hervortreten zu lassen (Tabellen 1 u. 2). Es scheint aber, daß der jährliche Gang des vertikalen Leitungsstromes i_+ im allgemeinen den des Potentialgefälles $\frac{dV}{dh}$ parallel geht, mit einem Maximum im Winter (Januar) und einem Minimum im Sommer (Juli). Doch sind die Abweichungen der Extremwerte voneinander beim Ionenstrom viel kleiner als beim Potentialgefälle (s. Tabelle 2). Es wirkt nämlich neben dem Potentialgefälle namentlich noch die Leitfähigkeit auf den vertikalen Leitungsstrom ein und zwar in entgegengesetztem Sinne, also ausgleichend. Aus Tabelle 2 ergibt sich nämlich, daß die Leitfähigkeit im allgemeinen gerade den entgegengesetzten jährlichen Verlauf nimmt als das Gefälle. Auf die Bedeutung des Hauptmaximums im Mai wurde bereits Seite 321 hingewiesen.

3. Einfluß meteorologischer Faktoren auf die luftelektrischen Elemente i_+, $\frac{dV}{dh}$ und λ_+.

Von größtem Einfluß auf die Leitfähigkeit und damit auch auf den Ionenstrom ist die Reinheit der Luft von Staub und nebeliger Trübung. Dies zeigt deutlich die Tabelle 4, in welcher das Beobachtungsmaterial nach dem Grade der Durchsichtigkeit der Luft geordnet ist. Recht deutlich tritt hierin auch der enorme Anstieg des Potentialgefälles bei Bodennebel und die gleichzeitige starke Verminderung der Leitfähigkeit hervor. Trotz des hohen Potentialgefälles bleibt, infolge der geringen Leitfähigkeit, der Ionenstrom (direkt gemessen) klein, was darauf hinweist, daß auch beim normalen vertikalen Leitungsstrom vorwiegend nur die leichtbeweglichen Ionen und nicht auch die viel zahlreicheren Molionen beteiligt sind. Es liefert daher auch das von H. Ebert in die luftelektrische Meßtechnik eingeführte Aspirationsverfahren richtige Werte für den Ionenstrom, die durchaus mit den hier direkt gemessenen vergleichbar sind.

Tabelle 4. **Luftreinheit.**

	i_+ $\frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	σ $\frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh}$ $\frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	λ_+ $E.S.E.$	Zahl der Tage
Klar . . .	$1{,}77 \cdot 10^{-16}$	$6{,}76 \cdot 10^{-4}$	255	$6{,}24 \cdot 10^{-5}$	65
Dunstig . .	1,28	7,32	276	4,18	69
Sehr dunstig	0,92	6,85	258	3,21	24
Nebel . . .	1,06	13,74	517	1,84	17

Hierher gehört auch der Einfluß der Windrichtung. Die Münchener Sternwarte liegt am Ostrande der Stadt. Alle von W, S-W und N-W kommenden Winde führen Staub und Ruß aus der Stadt mit sich und bewirken dadurch eine Molisierung der Ionen und bedeutende Abnahme der Leitfähigkeit, wie Tabelle 5 zeigt.

Tabelle 5. **Windrichtung.**

Windrichtung	i_+ $\frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	σ $\frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh}$ $\frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	λ_+ $E.S.E.$	Zahl der Tage
E	$1{,}99 \cdot 10^{-16}$	$6{,}29 \cdot 10^{-4}$	237	$7{,}56 \cdot 10^{-5}$	75
S	1,47	10,14	382	3,46	14
W	0,94	8,65	326	2,60	67
N	0,72	5,44	205	3,17	12

Allein der E-Wind führt hier reine Landluft zum Beobachtungsorte, weshalb wohl die zu dieser Zeit gemessenen Werte ihrem absoluten Betrage nach die richtigsten sind. Hienach wären für die hiesige Gegend folgende Werte die zutreffendsten:

Gesamtleitungsstrom $i = 2 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}99 \cdot 10^{-16} = 2{,}4 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$

Gesamleitfähigkeit $\lambda = 2 \cdot 7{,}56 \cdot 10^{-5} = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ E.S.E.$

Dieser Wert für λ stimmt auch gut mit jenem überein, den H. Ebert[1]) auf dem Lande in der Nähe Münchens nach der Aspirationsmethode fand, nämlich $\lambda = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ E.S.E.$ und jenem, den A. Dannderer[2]) in Bad Aibling, 42 km s.-ö. von München ermittelte, $\lambda = 2{,}7 \cdot 10^{-4}\ E.S.E.$

Das geringe Leitvermögen der Stadtluft, das unter Umständen auf den zehnten Teil des normalen Wertes herabsinken kann, wurde auch anderwärts beobachtet, so bei den Leitfähigkeitsmessungen in Potsdam[3]), Edinburgh[4]) und Sidney[5]) (vgl. auch Tabelle 3). Die Leitfähigkeit gibt also geradezu ein Maß für die physikalische Reinheit der Luft eines Ortes ab.

---

[1]) H. Ebert, Physikal. Zeitschr. 6, 826, 1905.
[2]) A. Dannderer, Dissert. l. c., S. 93.
[3]) K. Kähler, l. c., S. XVI.
[4]) G. A. Carse und D. Mac Owan, l. c., S. 464.
[5]) A. Pollock, Le Radium 6, 135, 1909.

Geradeso, wie Staub und Rauch, vermindert auch der Wasserdampf der Luft die Beweglichkeit der Ionen durch Molisierung. Daß es insbesondere die relative Feuchtigkeit ist, deren Anwachsen eine Herabminderung des Leitvermögens der Luft verursacht, wurde schon bei den ersten Zerstreuungsmessungen durch Elster und Geitel[1]) nachgewiesen und erklärt und ist seitdem vielfach bestätigt worden. Dieser Zusammenhang ergibt sich auch aus meinen Messungen, Tabelle 6.

Tabelle 6. **Relative Feuchtigkeit.**

%	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E.$	Zahl der Tage
0—50	$1{,}70 \cdot 10^{-16}$	$5{,}69 \cdot 10^{-4}$	214	$7{,}14 \cdot 10^{-5}$	27
51—65	1,18	6,52	246	4,32	58
66—80	1,33	8,92	336	3,57	51
81—100	1,75	9,64	363	4,33	39

Dem Wiederansteigen von λ_+ bei den höchsten Feuchtigkeitsgraden 81—100 % liegt folgende Ursache zu Grunde. Im Frühjahre und namentlich im Herbste, zeigte das im Schatten aufgestellte Hygrometer nach Zubodensinken des Morgennebels noch außerordentlich hohe Feuchtigkeitsgrade an, während am Beobachtungsplatze bei klarem Sonnenscheine große Werte für i_+ (und λ_+) gemessen wurden. Würden bei der Mittelbildung diese Tage ausgeschaltet werden, so ergäben sich für die größten Werte der relativen Feuchtigkeit die kleinsten λ_+.

Ein Zusammenhang zwischen dem vertikalen Leitungsstrom und der relativen Feuchtigkeit ergab sich nicht. Dagegen tritt ein solcher deutlich hervor bei Ordnung des Materiales nach Dampfdruck-Gruppen (Tabelle 7).

[1]) J. Elster und H. Geitel, Sitz.-Ber. d. Akad. d. Wiss. in Wien, math.-phys. Kl. 111 (IIa) 965, 1902.

Tabelle 7. **Dampfdruck.**

mm Hg	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E.$	Zahl der Tage
0,0— 3,0	$1{,}86 \cdot 10^{-16}$	$12{,}19 \cdot 10^{-4}$	459	$3{,}65 \cdot 10^{-5}$	16
3,1— 6,0	1,64	9,51	358	4,12	61
6,1— 9,0	1,26	5,93	223	5,07	49
9,1—13,5	1,19	6,06	228	4,69	49

Der vertikale Ionenstrom i_+ und das Potentialgefälle sinken mit zunehmender absoluter Feuchtigkeit, während die Leitfähigkeit keinen regelmäßigen Gang erkennen läßt. Die Ursache des Absinkens des Leitungsstromes liegt wohl im Verhalten des Potentialgefälles, das, wie zuerst F. Exner fand, mit zunehmendem Dampfdrucke abnimmt. Allerdings konnte eine hinreichende Erklärung für diesen Zusammenhang, der sich an den meisten Beobachtungsorten zeigte, bisher noch nicht gefunden werden.

Aus Tabelle 8 geht hervor, daß zwischen der Temperatur der Luft (trockenes, beschattetes Thermometer) und der Leitfähigkeit λ_+ kein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht.

Tabelle 8. **Lufttemperatur.**

C°	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E.$	Zahl der Tage
—12°,0—0°,0	$2{,}30 \cdot 10^{-16}$	$13{,}09 \cdot 10^{-4}$	494	$4{,}19 \cdot 10^{-5}$	24
0,1— 5,0	1,36	10,72	404	3,03	26
5,1—10,0	1,48	6,77	255	5,22	27
10,1—15,0	1,23	5,77	218	5,09	30
15,1—20,0	1,22	6,29	237	4,64	41
20,1—26,0	1,22	5,76	217	5,06	27

Wohl aber besteht ein solcher zwischen der Bodenwärme und der Leitfähigkeit wie die Tabellen 1 und 2 erweisen. Dieses eigentümliche Verhalten läßt sich am besten durch die „Bodenatmung“ erklären, wie dies schon Seite 321 und Seite 351 auseinandergesetzt wurde. Im Verhalten von i_+ und $\frac{dV}{dh}$ gegenüber der Temperatur drückt sich auch in Tabelle 8 der jährliche Verlauf beider Elemente deutlich aus (vergleiche Tabellen 1 und 2).

Ganz entsprechend der Seite 351 entwickelten Anschauung wirkt auch der Luftdruck auf die Leitfähigkeit λ_+ ein. Nicht die absolute Größe des Luftdruckes ist maßgebend, sondern die Luftdruckschwankung. Dies ergibt sich deutlich aus Tabelle 9 und Tabelle 10.

Tabelle 9. Luftdruckänderung.

Barometer	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E.$	Zahl der Tage
Steigt . .	$1{,}24 \cdot 10^{-16}$	$7{,}86 \cdot 10^{-4}$	296	$3{,}77 \cdot 10^{-5}$	36
Konstant .	1,41	7,39	278	4,56	66
Fällt . . .	1,55	8,11	305	4,57	73

Bei sinkendem Luftdrucke quellen Emanationen und fertig gebildete + Ionen im Überschusse aus dem Boden heraus, die Leitfähigkeit und damit der Ionenstrom steigen. Bei steigendem Luftdrucke ist dieser Prozeß abgestellt, Leitfähigkeit und Ionenstrom sinken. Konstanter Luftdruck, mit andauernden kurzen Schwankungen wirkt, wie Dannderer[1]) gezeigt hat, geradeso wie der fallende Luftdruck. Eine weitere Unterteilung des Beobachtungsmateriales nach diesem Gesichtspunkte wurde aber, seines geringen Umfanges wegen, hier nicht vorgenommen, woraus sich wohl die hohen Werte von λ_+ bei konstantem

[1]) A. Dannderer, Diss. l. c., S. 77.

Tabelle 10. **Luftdruckhöhe.**

mm Hg	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E.$	Zahl der Tage
700,0—705,0	$1{,}38 \cdot 10^{-16}$	$10{,}74 \cdot 10^{-4}$	406	$3{,}07 \cdot 10^{-5}$	8
705,1—710,0	1,32	9,64	363	3,27	20
710,1—715,0	1,40	6,93	261	4,82	38
715,1—720,0	1,42	6,97	263	4,86	65
720,1—725,0	1,53	8,34	314	4,38	44

Barometerstande erklären. Daß mit zunehmendem Luftdrucke der Ionenstrom schwach ausgeprägt steigt (Tabelle 10), dürfte seinen Grund in der damit zumeist eintretenden Aufheiterung des Wetters haben; denn, wie schon aus den Tabellen 1 und 2 hervorgeht, ist der Leitungsstrom an heiteren Tagen größer als im Durchschnitt.

Demgemäß zeigt auch die Ordnung der Beobachtungen nach dem Grade der Bewölkung (zehnteilige Skala) eine sehr regelmäßige Abnahme des Ionenstromes und der Leitfähigkeit mit wachsender Bedeckung des Himmels (Tabelle 11).

Tabelle 11. **Bewölkungsgrad.**

Zehnteilige Skala	$i_+ \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$	$\sigma \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$	$\frac{dV}{dh} \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$	$\lambda_+ E.S.E$	Zahl der Tage
0—2	$1{,}89 \cdot 10^{-16}$	$9{,}12 \cdot 10^{-4}$	343	$4{,}96 \cdot 10^{-5}$	49
3—4	1,49	6,12	231	5,81	23
5—6	1,28	6,92	261	4,42	28
7—8	1,16	6,89	260	4,02	25
9—10	1,17	8,19	309	3,42	50

Überblickt man die vorstehenden Tabellen, so erscheint es als wahrscheinlich, daß die eigentliche unabhängige Variable unter den luftelektrischen Elementen i, $\frac{dV}{dh}$ und λ die Leitfähigkeit λ ist. Sie bestimmt im großen und ganzen den Gang des Potentialgefälles, beide zusammen den des Ionenstromes, und sie wiederum wird beeinflußt von zahlreichen meteorologischen Faktoren, sowie von der Beschaffenheit und Bestrahlung des Erdbodens. Es ist klar, daß bei der gemeinsamen Tätigkeit so vielerlei Einflüsse dieser Zusammenhang nicht immer deutlich zu Tage tritt. Der kurz „die Luftelektrizität" benannte Naturvorgang ist vielmehr ein ganz verwickelter Erscheinungskomplex, der erst in neuerer Zeit, namentlich durch die Arbeiten von Exner, Elster und Geitel, Ebert u. a. unserem Verständnisse näher gerückt wurde.

Die Ergebnisse der vorliegenden Messungen lassen sich etwa wie folgt zusammenfassen:

1. Es wird ein Apparat beschrieben, welcher nach der Methode von C. T. R. Wilson in genauer und einfacher Weise die elektrische Oberflächendichte und den vertikalen positiven elektrischen Leitungsstrom in absolutem Maße bestimmen läßt. Hiemit läßt sich das Potentialgefälle und die polare positive Leitfähigkeit berechnen. Im ganzen können also mit ein und demselben Apparat vier der wichtigsten luftelektrischen Elemente ermittelt werden, bei einer Meßdauer von etwa 7 Minuten.

2. An 97 heiteren, wenig bewölkten Tagen wurden folgende Werte, reduziert auf die Ebene, gefunden:

Elektrische Oberflächendichte $\sigma = 8{,}33 \cdot 10^{-4} \frac{E.S.E.}{\text{cm}^2}$,

Potentialgefälle $\frac{dV}{dh} = 188 \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$,

Gesamt-Leitungsstrom $i = 2{,}04 \cdot 10^{-16} \frac{\text{Amp.}}{\text{cm}^2}$,

Gesamt-Leitfähigkeit $\lambda = 0{,}98 \cdot 10^{-4}\ E.S.E.$

3. Staub, Rauch und zunehmende relative Feuchtigkeit vermindern den Ionenstrom und die Leitfähigkeit stark. Der normale vertikale Leitungsstrom wird also vorwiegend von den leichtbeweglichen Ionen getragen.

4. Bei zunehmendem Dampfdrucke sinkt der Ionenstrom und das Potentialgefälle, die Leitfähigkeit schwankt unregelmäßig.

5. Auch die vorstehenden Messungen bestätigen, daß nicht die Lufttemperatur, sondern die Bodenwärme von Einfluß auf die Werte i, λ und $\frac{dV}{dh}$ ist. Nicht die absolute Größe, sondern die Änderung des Luftdruckes wirkt auf i und λ ein. Beides weist auf die Bodenatmung hin, im Sinne der Ebertschen Theorie.

Die vorstehend mitgeteilten Messungen waren nur durch wiederholte Unterstützung seitens der K. Bayer. Akademie der Wissenschaften möglich. Sie gewährte dem Erdmagnetischen Observatorium (Sternwarte) die Mittel zur Beschaffung des Benndorfschen Apparates, des Wilsonschen Apparates und verschiedener notwendigen Hilfsinstrumente. Es sei mir daher gestattet, der K. Bayer. Akademie der Wissenschaften auch an dieser Stelle meinen Dank auszusprechen.

Ganz besonderen Dank schulde ich auch Herrn Professor H. Ebert, welcher die luftelektrischen Beobachtungen am hiesigen Erdmagnetischen Observatorium seit Beginn auf das wirksamste fördert.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Klasse der Bayerischen Akademie der Wissenschaften München

Jahr/Year: 1911

Band/Volume: 1911

Autor(en)/Author(s): Lutz Carl W.

Artikel/Article: Luftelektrische Messungen am Erdmagnetischen Observatorium (Sternwarte) München. Messung des vertikalen Leitungsstromes Luft - Erde im Jahr 1909 329-360