

Sonderdruck aus
„Annalen der Physik.“ IV. Folge.
Bd. 75. 1924.

Verlag von Joh. Ambr. Barth in Leipzig.

1924

3611/2/G/53

1. *Über den unmittelbaren Nachweis der elektrischen Erdladung;*
von Carl Ramsauer.

Aus der Abnahme des Potentials V mit der Höhe h über dem Erdboden pflegt man auf die Oberflächendichte σ der Erde zu schließen nach der Formel

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

Bei einem Durchschnittswert von 100 Volt/Meter erhält man so in runden Zahlen für die eigentliche Erdkugel die Gesamtladung $-5 \cdot 10^5$ Coulomb und das Potential $-6 \cdot 10^8$ Volt.

Dieser Schluß ist potentialtheoretisch durchaus zwingend, wird aber trotzdem meist mit einer gewissen Reserve wiedergegeben. So sagt Hr. Kähler in seinem bekannten Buche über Luftelektrizität (2. Aufl. 1921, Samml. Göschen): „Peltier nahm, um die Schönwetterelektrizität zu erklären, eine *negative Oberflächenladung der Erde* an. Diese Vorstellung gilt heute noch. Sie ist schon durch Rechnung aus der Zunahme der Spannungsdifferenz mit wachsender Höhe ableitbar und durch eine ganze Reihe von Beobachtungstatsachen, die wir im Laufe der folgenden Betrachtungen kennen lernen werden, zu beweisen.“ Diese Vorsicht in der Darstellung ist verständlich. Der Übergang von Laboratoriumsergebnissen zu kosmischen Schlüssen erscheint hier besonders bedenklich, weil alle Versuchsgrundlagen der Potentialtheorie ja gerade gegenüber dem Erdniveau als Bezugswert gewonnen sind, und weil der Potentialbegriff in seiner praktischen Anwendung stets nur relativen und niemals absoluten Charakter hat.

Aus diesem Grunde hielt ich es trotz meiner eigenen Überzeugung von der strengen Gültigkeit der obigen Gleichung doch für lohnend, die elektrische Oberflächenladung der Erde auch auf direktem experimentellen Wege nachzuweisen. Ein

solcher Versuch ist seiner Art nach gerade so berechtigt wie die bekannten direkten Versuche von Benzenberg¹⁾ und Foucault zum Beweis der Erddrehung. Jeder gesund denkende Physiker hält die Erddrehung auch ohne dies für unzweifelhaft und freut sich trotzdem über die experimentellen Beweise von unmittelbarer Anschaulichkeit. —

Der atomneutrale Zustand als Bezugswert. Für die Durchführung dieses Gedankens muß zunächst ein absolut gültiger und experimentell herstellbarer Neutralwert angegeben werden. Ein solcher wird in der modernen Physik dauernd benutzt, ohne daß er allerdings meines Wissens gegenüber der nur relativen Neutralität der Erdkugel genügend hervorgehoben wird. Absolut neutral in diesem Sinne ist jedes Atom, dessen Elektronenzahl in der Hülle gleich der Anzahl der überschüssigen positiven Ladungseinheiten des Kerns ist, und somit jeder Körper, welcher sich aus solchen neutralen Atomen zusammensetzt. Dabei ist diese Festlegung auch von unmittelbarer experimenteller Bedeutung, da der atomneutrale Zustand eines Körpers sich durch das Fehlen beschleunigender Kräfte im homogenen elektrischen Felde direkt nachweisen läßt. Unsere Frage lautet dann so: Wieviele Elektronen über oder unter dem atomneutralen Zustand besitzt ein gegebenes Oberflächenstück der Erdkugel?

Wie erhält man nun weiter diesen Bezugswert in experimentell verwendbarer Art? Die verlangte Atomneutralität ist gegeben durch den elektrischen Zustand im Innern jedes leitenden Körpers, ohne irgendwelche Rücksicht auf seinen elektrischen Außenzustand. Dieser Satz folgt aus unseren geltenden theoretischen Vorstellungen, soll aber in diesem prinzipiellen Zusammenhang lieber auf unmittelbare experimentelle Tatsachen zurückgeführt werden. Zunächst denkt man hierbei an die klassischen Versuche von Cavendish und Faraday über das Fehlen aller elektrischen Kräfte im Innern

1) Die Versuche von Benzenberg über die östliche Voreilung der fallenden Körper (ausgeführt in dem Hamburger Michaelis-Kirchturm 1803, veröffentl. Dortmnd 1804) werden viel zu wenig gewürdigt; sie sind von derselben anschaulichen Beweiskraft und von größerer mathematischer Einfachheit wie der Foucaultsche Pendelversuch, und liegen dabei fast 50 Jahre vor Foucault.

eines Leiters, stößt aber auf die Schwierigkeit, daß es sich hier in der experimentellen Ausführung stets nur um Potentialdifferenzen gegen die Erde gehandelt hat, daß also zunächst nicht gesagt ist, ob die bewiesene Neutralität des Leiterinnern eigentlich Erdneutralität oder Atomneutralität ist. Ich habe es daher der Einfachheit wegen vorgezogen, diese Versuche in der Weise zu variieren, daß die obige Kennzeichnung der Atomneutralität als das Fehlen aller beschleunigenden Kräfte im elektrischen Felde unmittelbar anwendbar wird. Zu diesem Zwecke stellte ich ein Quadrantenelektrometer in ein isoliertes völlig geschlossenes Metallgefäß. Die Nadel war mit der Gefäßhülle verbunden, die beiden Quadrantenpaare waren durch eine kleine Batterie, welche sich ebenfalls in dem Gefäß befand und deren Mitte an die Gefäßhülle angeschlossen war, auf eine Potentialdifferenz von 40 Volt aufgeladen. Die Ablesung erfolgte durch eine enge, mit Metallnetz bedeckte Öffnung mittels Fernrohr und Skala. Wenn nun das Gefäß auf beliebige Potentiale gebracht wurde (bis 40000 Volt), so zeigte die Nadel nicht den geringsten Ausschlag, während $\frac{1}{4000}$ Volt noch bemerkbar gewesen wäre, einerlei, ob die Ladung gleichmäßig über die ganze Hülle verteilt war oder ob durch Annäherung geerdeter Leiter für unregelmäßige Ladungsverteilung gesorgt wurde. Hieraus folgt unmittelbar der obige Satz: Die Nadel zeigt keine Wanderung im elektrischen Felde, das Innere des leitenden Körpers ist also atomneutral.¹⁾

Das Prinzip der Methode. Die Methode beruht auf dem Vergleich des elektrischen Zustandes der Erdoberfläche mit dem atomneutralen Zustand des Erdinnern. Wir nehmen, um eine ganz bestimmte Vorstellung zu haben, ein kleines Stück der Erdrinde als aus Metall bestehend an. Wir denken uns jetzt ein quadratisches Stück P der Oberflächenschicht von etwa 1 m^2 Fläche und geringer Dicke, also eine Art Blechtafel, losgelöst. Die Lösungsstelle vertiefen wir um einige

1) Der Versuch läßt sich natürlich sowohl durch Vergrößerung der Elektrometerempfindlichkeit wie durch Erhöhung des Aufladepotentials wesentlich verfeinern, mag aber hier genügen, zumal da die bisherigen Versuche, auf die sich unsere Kenntnis von der Beschränkung der elektrischen Ladung auf die Oberfläche stützt, in ihren ursprünglichen und in ihren jetzt üblichen Ausführungen durchweg wesentlich roher sind.

Zentimeter und erweitern sie außerdem nach allen Richtungen um einige Millimeter. Auf die Grundfläche G der Vertiefung stellen wir isolierende Stützen SS und legen die Blechtafel P darauf, derart, daß sie ganz in ihre ursprüngliche Lage kommt und also wieder einen Teil der Erdoberfläche bildet (Fig. 1). Wir nehmen jetzt eine zweite etwas größere Blechtafel P' mit einem Blechrand R , welche nach Belieben über P gestülpt werden kann, wie es die Figur zeigt, oder ganz entfernt werden kann. P kann über einen isolierten Hebel H , der sich in einem Schlitz des Blechrandes bewegt, mit der einen Klemme eines Galvanometers verbunden werden, dessen andere Klemme geerdet ist.

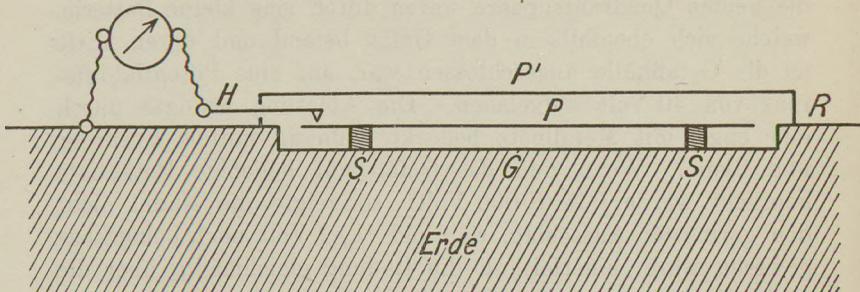


Fig. 1.

Das Versuchsschema ist folgendes:

1. P' ist entfernt; H ist heruntergeklappt und verbindet P mit Erde über das Galvanometer. P hat diejenige Ladung E , welche ihm gemäß seiner Lage als Teil der Erdoberfläche zukommt.

2. H wird hochgeklappt; P' wird übergestülpt; P' ist jetzt Erdoberfläche. P hat zunächst noch seine Ladung E , hat aber jetzt das Bestreben, diese Ladung abzugeben, da es im Erdinnern liegt.

3. H wird heruntergeklappt. P entlädt sich über das Galvanometer, bis es atomneutral geworden ist. Hierbei wird die ursprünglich auf P befindliche Ladung E durch den ballistischen Ausschlag des Galvanometers gemessen.

An Stelle dieses Schemas kann man auch den umgekehrten Weg einzuschlagen:

1. Das Endstadium der vorigen Reihe ist als Anfangsstadium gegeben. H wird hochgeklappt.

2. P' wird entfernt. P ist atomneutral, müßte aber seiner Lage nach, nämlich wieder als Teil der Erdoberfläche, eine entsprechende Ladung E haben.

3. H wird heruntergeklappt, P lädt sich über das Galvanometer bis zur Ladung E auf. Hierbei wird E durch den ballistischen Ausschlag des Galvanometers gemessen.

Die absolute Größe von E ist in beiden Fällen die gleiche, die Stromrichtung ist aber verschieden, entsprechend dem Gegensatz von Entladung und Wiederaufladung.

Die Ausführung der Methode. Die benutzte Anordnung entspricht mit geringfügigen Änderungen der Fig. 1. Eine mit Erde leitend verbundene Grundplatte G aus Zinkblech von 1 m^2 Fläche bildet die obere Belegung einer Tragbahre aus Holz. Über dieser Grundfläche steht die Platte P aus Zink von $90 \times 90 \text{ cm}$ Fläche und 3 mm Dicke auf versenkten 1 cm über G hervorragenden Bernsteinstützen SS . Über P kann P' aus dünnem Zinkblech von $96 \times 96 \text{ cm}$ Fläche und 10 cm Randhöhe gestülpt werden, so daß der Rand auf der Grundplatte G aufsteht. Von einem Schutzing, wie er sich aus der genauen Nachahmung der Fig. 1 ergeben würde, ist hier abgesehen, da der Abstand zwischen P und G sehr klein ist, und die überragenden Flächen von G als eine Art Schutzing dienen. P kann durch den mit Bernsteinhandgriff zu betätigenden Hebel H mit der einen Klemme eines Drehspulgalvanometers verbunden werden, dessen andere Klemme an die Grundplatte G angeschlossen ist. Die Galvanometerempfindlichkeit bei 315 cm Skalenabstand entspricht für 1 mm ballistischen Ausschlag $15 \times 10^{-10} \text{ Coulomb}$. Es ist zu bemerken, daß 1 mm der Ableseskala infolge der abnorm starken Vergrößerung des benutzten Fernrohrs $2-3$ mal so groß aussieht, wie bei den gebräuchlichen Verhältnissen, wobei die betreffende Skalenstelle durch 3 Lampen so intensiv wie möglich beleuchtet wird; trotzdem beträgt die Genauigkeit nur etwa $1/2$ Skalenteil, da das Galvanometer aus äußeren Gründen nicht ganz erschütterungsfrei aufgestellt werden konnte. — Ein lichtelektrischer Einfluß auf das Zink wurde übrigens nicht beobachtet, da es sich um sehr alte Oberflächen handelte.

Da für die Erdoberfläche selbst zu geringe Ausschläge zu erwarten waren, so wurde die ganze Apparatur auf dem

flachen Dach des Chemischen Instituts der Technischen Hochschule aufgestellt. Die Apparatur stand auf 140 cm hohen Böcken, so daß sie die Abzugsröhren usw. überhöhte. Die Verbindung der Grundplatte G mit der Erdoberfläche wurde durch Anschluß an das netzartige Blitzableitersystem bewirkt. Das Galvanometer mußte auf dem Speicher des Instituts aufgebaut werden.

Die gemessenen Ausschläge variieren stark mit der Zeit, zwischen Null und 5 Skalenteilen. Als günstiges Beispiel sei eine Reihe angeführt, bei welcher die beiden obigen Schemata abwechselnd gebraucht sind. Entladung — 3. Wiederaufladung + 3,5; + 3,5; + 3. Entladung — 3,5; — 3,5; — 4. Wiederaufladung + 3,5; + 3. Nimmt man als zeitliches Mittel 3,4, so gibt das 51×10^{-10} Coulomb auf $0,8 \text{ m}^2$, also 64×10^{-10} Coulomb/m² für die spezielle Lage von P in diesem speziellen Zeitpunkt. Das Vorzeichen der gemessenen Ladung ist negativ, d. h. das Quadratmeter hat einen Überschuß von 64×10^{-10} Coulomb : 16×10^{-20} Coulomb = 4×10^{10} Elektronen über den atomneutralen Zustand.

Der Ersatz des Galvanometers durch das Elektrometer. Die Galvanometermessung ist für die natürliche Erdoberfläche zu unempfindlich, wenn man sich auf leicht zu handhabende Galvanometertypen beschränken will. Experimentell einfacher ist es, die Potentialdifferenz¹⁾ von P gegen Erde im gewöhnlichen Sinne durch ein Einfadenelektrometer mittlerer Empfindlichkeit nach Überstülpung von P' zu bestimmen und daraus mit Hilfe der vorher festgestellten Kapazität von P in dieser Lage ($9,7 \cdot 10^{-10}$ Farad einschließlich Elektrometer) die Elektrizitätsmenge E zu berechnen. So wurden gleichzeitig mit den oben angeführten Galvanometerwerten alternierend die Elektrometerwerte aufgenommen bei einer Empfindlichkeit von 2,6 Skalenteilen/Volt. Es ergaben sich folgende Zahlen: 12; 18; 13; 16. 15; 15; 15. 15; 15. 13; 13. 13; 13. Das Gesamtmittel von 14,3 entspricht 5,5 Volt oder $5,5 \times 9,7 \cdot 10^{-10}$ Cou-

1) Keinesfalls ist die gemessene Potentialdifferenz das Erdpotential, welches nur aus der Gesamtladung der Erde und der Gesamtkapazität der Erde berechnet werden kann. P besitzt eben als Einzelkörper gegenüber einer Umgebung von gemeinsamem elektrischem Zustand eine ganz andere Kapazität wie als Teil der Erde.

$lomb = 53 \times 10^{-10}$ Coulomb gegenüber 51×10^{-10} Coulomb nach den Galvanometermessungen. Diese Abweichung liegt durchaus innerhalb der meist viel größeren Schwankungen.

Dagegen ist es *nicht* möglich¹⁾, auch die zweite Form der Galvanometermessung, die von dem atomneutralen Zustand von P ausgeht, durch eine Elektrometermessung zu ersetzen. In demselben Augenblick, in welchem P' abgehoben wird, beginnt nämlich das Erdfeld auf P influenzierend zu wirken.

Hierdurch wird E entsprechend der Formel $4\pi\sigma = -\frac{dV}{dh}$ auf der oberen Fläche von P gebunden und $-E$ abgestoßen („—“ nur im Gegensatz zu der gebundenen Ladung). Das $-E$ kann aus dem vom Elektrometer angezeigten Potential und der auch für diese Bedingungen bestimmten Kapazität von P berechnet werden, ist hier aber lediglich durch die Wirkung des gegebenen Erdfeldes bedingt, d. h. diese Messung ist im Prinzip keine direkte Bestimmung von σ , sondern von $\frac{dV}{dh}$, wie sie auch von den Herren Wilson und Lutz aufgefaßt und verwertet wird.

1) Ich hatte anfangs angenommen, daß auch dieser Versuch das ursprüngliche Vorhandensein einer Ladung E auf P unmittelbar beweise, indem das atomneutral gewordene P unter diesen Bedingungen gegenüber seiner unveränderten Umgebung sich genau so verhielte, als ob es die Ladung $-E$ trüge („—“ nur im Gegensatz zum ursprünglichen E). Ich bin aber durch die unten angeführten Arbeiten Hrn. C. T. R. Wilsons zu der oben weiter entwickelten Auffassung geführt worden. Diese Arbeiten beziehen sich in erster Linie auf den vertikalen Leitungsstrom, weswegen sie mir auch erst nach Abschluß meiner Versuche bekannt geworden sind, enthalten aber daneben eine Methode zur Bestimmung

von $\frac{dV}{dh}$ nach dem im obigen Text behandelten Schema, wobei die be-

sondere Art der Messung in sehr eleganter Form dem Hauptthema der Arbeiten angepaßt ist. Vgl. C. T. R. Wilson, On a Portable Gold-leaf Electrometer for Low or High Potentials, and its application to Measurements in Atmospheric Electricity; und On the Measurement of the Earth-Air Current and on the Origin of Atmospheric Electricity. Proceed. of the Cambridge Philosoph. Soc. Vol. XIII. S. 184 bez. 363. 1905/06. On the Measurement of the Atmospheric Electric Potential Gradient and the Earth-air Current. Proceed. of the Roy. Soc. A. Vol. 80. S. 537. 1908. — Ferner als Anwendungsbeispiel: C. W. Lutz, Messung des vertikalen Leitungsstromes Luft-Erde im Jahre 1909. Sitzber. d. Akad. d. Wiss. zu München, Math. Phys. Cl. 1911. S. 329.

Das prinzipielle Verhältnis zwischen Oberflächendichte und Erdfeld. Der Übersichtlichkeit wegen seien hier noch einmal die verschiedenen behandelten Fälle zusammengestellt:

1. Die ursprüngliche Ladung fließt durch das Galvanometer ab, wenn P ins Erdinnere verlegt wird.
2. Die ursprüngliche Ladung fließt durch das Galvanometer wieder zu, wenn P wieder ein Teil der Erdoberfläche geworden ist.
3. Die ursprüngliche Ladung ruft eine Potentialdifferenz gegen Erde hervor, wenn P in das Erdinnere verlegt wird, und ist aus dieser mit Hilfe der Kapazität von P zu berechnen.
4. Das gegebene Feld der Erde, welches in der Nachbarschaft von P ungeändert erhalten bleibt, wirkt influenzierend auf das atomneutral gewordene P ein, wenn P wieder ein Teil der Erdoberfläche geworden ist. Die zur Messung gelangende abgestoßene Elektrizitätsmenge ist hierbei nur ein Maß für die Wirkung des Erdfeldes.

Nr. 4 scheidet für unsere Betrachtungen völlig aus. Nr. 2 ist beweiskräftig bezüglich der ursprünglichen Ladung von P , indem der frühere Zustand gänzlich wieder hergestellt wird, verliert aber dadurch etwas an unmittelbarer Klarheit, als auch hier das Erdfeld die treibende Ursache ist. Nr. 1 und 3 sind beide einwandfrei, da das Erdfeld ganz ausgeschaltet ist, doch verdient Nr. 1 den Vorzug, da der Vorgang in diesem Falle so einfach und anschaulich ist, daß er keine andere Deutungsmöglichkeit zuläßt wie das ursprüngliche Vorhandensein einer Ladung auf dem betreffenden Oberflächenstück der Erde.

Dabei ist logisch die Oberflächenladung der Erde im ganzen als die primäre Ursache, das Erdfeld als die Wirkung anzusehen. Die Hervorrufung der Erdladung durch die bloße Influenzwirkung eines schon vorhandenen fremden Feldes, wie sie z. B. von positiven Wolken oder Himmelskörpern ausgehen würde, ist deshalb ausgeschlossen, weil dann die Erdoberfläche gerade soviel positive wie negative Elektrizität zeigen müßte. Dagegen muß beachtet werden, daß derartige fremde Ladungen die Verteilung der negativen Oberflächenladung auf der Erde wesentlich beeinflussen können. Das heißt also im ganzen:

Die negative Gesamtladung der Erde, nämlich ein bestimmter Elektronenüberschuß über den atomneutralen Zustand, ist primär vorhanden; die tatsächlich beobachtete Differenz gegen die hierdurch gegebene Durchschnittsdichte wird dagegen durch fremde Ladungen bedingt.

Einige Messungsergebnisse. Letzten Endes gesucht ist die Elektrizitätsdichte auf dem Erdboden selbst, während die Apparatur meist auf 140 cm hohen Böcken stand. Durch alternierenden Vergleich wurde festgestellt, daß sich die Werte für 145 cm Gesamthöhe zu den Werten für 0 cm Höhe (bei etwas eingegrabener Tragbahre) verhalten wie 2,4 zu 1 und entsprechend umgerechnet werden müssen. Als höchster beobachteter Wert auf ebener Erde in mäßig freiem Gelände ergab sich nunmehr 15×10^{-10} Coulomb/m², wobei es sich aber nur um Messungen innerhalb weniger Tage handelte. Dies gibt für je 1 m² rund die Zahl von 1×10^{10} Elektronen über den atomneutralen Zustand. Die zeitlichen Schwankungen waren beträchtlich, wie dies ja auch vom Potentialgefälle bekannt ist. In einem Falle sank die Dichte beim Einsetzen eines leichten Regens von 14×10^{-10} Coulomb/m² in wenigen Minuten auf Null. Die räumlichen Unterschiede entsprachen der Erwartung. Es wurden als Maximalwerte, gemessen in 10⁻¹⁰ Coulomb/m², gefunden: auf dem Institutsdach 125, auf ebener Erde 15, 5 m vom Hochschulgebäude entfernt 1,5, im Zimmer Spuren, wobei diese Werte jedoch wegen der nicht berücksichtigten zeitlichen Schwankungen nur die Bedeutung von Größenordnungen haben.

Zusammenfassung.

1. Die Frage nach der elektrischen Oberflächendichte der Erde wird durch die Beziehung auf den atomneutralen Zustand präzisiert. Letzterer wird verwirklicht als der elektrische Zustand im Innern jedes geschlossenen Leitersystems, unabhängig von der Elektrizitätsverteilung auf der Oberfläche.

2. Es wird eine Methode zur Bestimmung der Elektrizitätsladung auf einem gegebenen Oberflächenstück der Erde angegeben, indem man dieses Oberflächenstück zeitweise durch Überdeckung mit einer neuen Oberflächenschicht zu einem Teil des Erdinnern macht. Die hierbei eintretende Entladung

dieses ursprünglichen Oberflächenstücks bezüglich seine Wieder-aufladung nach Entfernung der übergestülpten Hülle wird durch ein Galvanometer gemessen.

3. Um diese etwas unempfindliche Methode auch für das freie Gelände brauchbar zu machen, kann die Galvanometer-messung, nach Überdeckung mit der neuen Oberflächenschicht, durch die Potentialmessung mittels Elektrometer unter Be-nutzung der Kapazität des Systems ersetzt werden, wobei beide Methoden zu den gleichen Ergebnissen führen. Dagegen bedeutet die Potentialdifferenz, welche das atomneutral ge-wordene Flächenstück gegenüber der Umgebung nach Ent-fernung der übergestülpten Hülle zeigt, lediglich eine Wirkung des influenzierten Erdfeldes, so daß man auf diesem Wege — prinzipiell betrachtet — nicht eine direkte Bestimmung der ursprünglichen Oberflächendichte, sondern des in der Um-gebung konstant gebliebenen Erdfeldes erhält.

4. Nach diesen Methoden werden nach verschiedenen Be-dingungen die Oberflächendichten festgestellt, d. h. es kann angegeben werden, wie groß der Überschuß an negativen Elektronen über den atomneutralen Zustand für das betreffende Oberflächenstück der Erde ist; hierbei wird als zufällig höchster Wert für 1 m^2 der Erdoberfläche die runde Zahl von 1×10^{10} Elektronen gefunden.

5. Die negative Gesamtladung der Erde, wie sie sich nach der entwickelten Meßmethode m^2 für m^2 ergibt, muß als das Primäre angesehen werden, wodurch das durchschnittliche Erdfeld hervorgerufen wird. Die Abweichungen von der so gegebenen Durchschnittsdichte werden dagegen durch die influenziende Wirkung fremder Ladungen bedingt, wie sie als Raumladungen der Atmosphäre beobachtet werden und außer-dem als Ladungen von Himmelskörpern denkbar sind.

Danzig, im Juni 1924.

(Eingegangen 10. Juli 1924.)