Die γ-Strahlung des Erdkörpers und ihr Anteil an der spontanen Ionisierung der Atmosphäre.

Von **Karl Bergwitz.**

Einleitung.

Schon seit Coulomb ist bekannt, daß die Luft wie alle Gase bei gewöhnlicher Temperatur in geschlossenen Gefäßen ein gewisses, wenn auch äußerst geringes elektrisches Leitungsvermögen (das Wort im allgemeinsten Sinne verstanden) hat.

Bei seinen grundlegenden Untersuchungen über die Fernwirkung elektrischer Körper fand Coulomb[1]) eine erhebliche Schwierigkeit darin, daß es unmöglich war, auf einem von Luft umgebenen, im übrigen aufs beste isolierten Leiter in einem abgeschlossenen Raume eine bestimmte Elektrizitätsladung dauernd zu erhalten. Es zeigte sich stets ein Abfluß der Elektrizität im Laufe der Zeit, der, wie nachgewiesen wurde, nur zum kleinsten Teile in einem Reste von Leitfähigkeit der Isolatoren begründet lag, die den Versuchskörper trugen. Coulomb schloß daraus, daß die Berührung des geladenen Körpers mit der Luft und ihren Beimengungen und in ihr schwebenden Staubpartikeln die Ursache des Verschwindens seiner Ladung sein müsse, wie denn auch mit wachsendem Grade der Luftverdünnung der Elektrizitätsverlust geringer wurde. — Für die Erscheinung selbst fand Coulomb auf experimentellem Wege die einfache Regel, daß die auf dem isolierten Körper vorhandene freie Elektrizitätsmenge nach dem Gesetz einer geometrischen Reihe im Laufe der Zeit abnimmt, also durch die Formel:

$$Q_t = Q_o \cdot e^{-\alpha t}$$

darstellbar ist, in der Q_t die zur Zeit t vorhandene Elektrizitätsmenge und α eine Konstante bedeutet, von deren Größe die Geschwindigkeit des Elektrizitätsverlustes, die sogenannte Zerstreuung, abhängt und die daher als Zerstreuungskoeffizient bezeichnet wird. — Da das Potential V eines Körpers bei

gleichbleibender Kapazität C seiner Ladung Q proportional ist infolge der Relation

$$Q = C . V,$$

so erkennt man, daß der Zerstreuungskoeffizient bei konstanter Kapazität des Versuchskörpers sowohl auf den Elektrizitätsverlust wie auf die Potentialabnahme bezogen werden darf. — Der Gedanke, daß der Elektrizitätsverlust an die Luft der augenblicklich vorhandenen Spannung proportional sein müsse, erscheint von vornherein so einleuchtend, daß eine kritische Untersuchung der Gültigkeit des Coulombschen Zerstreuungsgesetzes fast für überflüssig gehalten werden konnte. Befolgt doch auch der Wärmeverlust eines Körpers an seine Umgebung ein Gesetz derselben Form, und die elektrische Strömung in Metallen und Elektrolyten genügt der bekannten Ohmschen Bedingung, daß die zwischen zwei Querschnitten hindurchfließende Elektrizitätsmenge der Spannungsdifferenz proportional ist. Analogien dieser Art mögen das Vorurteil von der unbedingten Gültigkeit des Exponentialgesetzes der Elektrizitätszerstreuung befestigt haben; nur so ist es zu verstehen, daß Tatsachen unbeachtet blieben, die ihm direkt widersprachen.

Die erste Kenntnis dieser Abweichungen verdankt man den sorgfältigen und sehr mühevollen Untersuchungen von Matteucci[2]). Er arbeitete wie Coulomb mit der Drehwage. Der Zerstreuungsraum war zugleich der Meßraum. Matteucci beobachtete also in kleinem Luftraum bei hohen Potentialdifferenzen gegen die ihn einschließenden Wände. Er fand, daß die Zerstreuungskoeffizienten nicht konstant waren, sondern mit abnehmender Spannung wuchsen. Ja, Matteucci fand sogar schon, wie wir es jetzt nennen, den Sättigungsstrom für die Zerstreuung in der Luft, d. h. die Unabhängigkeit des Elektrizitätsverlustes in der Zeiteinheit vom Potential des Versuchskörpers in kleinen Gefäßen. Er stellte nämlich fest, daß in gleichen Zeiten gleiche Elektrizitätsmengen zerstreut wurden, unabhängig von der Spannung.

Diese Erfahrungen Matteuccis blieben zunächst unbeachtet, sie konnten auch damals gar nicht verstanden werden. Erst nach Jahren war es möglich, aller Schwierigkeiten Herr zu werden, als die Untersuchungen über die Natur der Elektrizitätsbewegung in Gasen zu der Aufstellung neuer Grundbegriffe, vornehmlich des Elektrons und des Ions und deren Gesetzen geführt hatten, und sie uns zeigten, daß das sicherste Kennzeichen einer Elektrizitätsleitung durch Ionen darin besteht, daß von einem bestimmten Punkte an ein durch

Ionen unterhaltener Strom bei Steigerung der Potentialdifferenz keinen merkbaren Anstieg mehr erfährt. Man spricht dann bekanntlich von einem gesättigten Strom.

Die Existenz des Sättigungsstromes in gewöhnlicher Luft, die von Geitel[3]) und fast gleichzeitig von C. T. R. Wilson[4]) wiedergefunden und richtig gedeutet wurde, liefert uns den strengsten Beweis dafür, daß die Luft unter den tatsächlich auf der Erde obwaltenden Verhältnissen sich wie ein ionisiertes Gas verhält. Nur unter ganz bestimmten Bedingungen, nämlich im unbegrenzten Raume, gehorcht dasselbe dem Ohmschen bzw. Coulombschen Gesetze. Daß es Ionen sind und nicht etwa Staubteilchen oder sonstige Beimengungen der Luft, die den Elektrizitätstransport besorgen, indem sie etwa nach Art des Korkkugeltanzes zwischen den beiden Elektroden hin und her gewirbelt werden, geht auch aus den Ausführungen von F. Harms[5]) hervor. Diese zeigen, daß bei konstanter Anzahl der an der Leitung beteiligten Partikelchen die Stromstärke der dritten Potenz der elektromotorischen Kraft proportional sein muß. Eine solche Abhängigkeit läßt sich aber weder aus den Versuchen Geitels noch denen von Wilson konstatieren. Die Versuche des ersteren gingen aus von der Ionisierung der freien Atmosphäre, die er gemeinsam mit J. Elster nachgewiesen hatte. Elster und Geitel knüpften dabei an die Arbeiten von Linss an, der als erster die Elektrizitätszerstreuung in der freien Luft systematisch beobachtet hatte. Es zeigte sich hauptsächlich, daß, je reiner und trockner die Luft war, desto größer im allgemeinen die Elektrizitätszerstreuung eines isoliert aufgestellten, geladenen Körpers gefunden wurde. War sie dagegen mit Staub-, Rauch- oder Wasserteilchen geschwängert, so hatte die Zerstreuung nur einen sehr geringen Betrag. Dieser Umstand führte die beiden Forscher zu dem Schlusse, daß die Ionisierung der freien Luft auf einer durch Gasionen vermittelten Leitung beruhe. Für abgeschlossene Luftmengen ergab sich derselbe Schluß aus der schon erwähnten Tatsache der Existenz des Sättigungsstromes. — Wilson kam zu demselben Ergebnisse durch ein von der Elektrizitätsleitung völlig unabhängiges Merkmal der Ionisierung eines Gases. Er wies zunächst an durch Röntgenstrahlen ionisierter, mit Wasserdampf gesättigter und staubfreier Luft nach, daß die Kondensation des Wasserdampfes eintrat, wenn die Expansion bis auf 1,3 stieg. Als er dann gewöhnliche Luft zu diesen Versuchen verwandte, zeigte sich dieselbe Erscheinung unter denselben Bedingungen, allerdings in weit geringerem Maße. Die Erklärung hierfür ist folgende: Be-

kanntlich tritt bei Expansion eingeschlossener, mit Wasserdampf gesättigter Luftmengen Kondensation des Dampfes ein, zum Teil im Innern der Luftmasse in Form von Nebel, zum Teil an den Gefäßwänden als flüssiges Wasser. Aitken hat nun festgestellt, daß die einzelnen Kondensationsstellen im Gasinnern zumeist durch Staubteilchen gebildet werden. — Entfernt man diese, so tritt, falls man die Expansion unter der angegebenen Grenze (1,3) hält, keine Nebelbildung ein. Läßt man nun von außen her eine Quelle der Ionenbildung wirken, z. B. Becquerel- oder Röntgenstrahlen, so stellt sich die Nebelbildung nach Expansion der Luft wieder ein. Die Ionen wirken also auch als Ansatzkerne bei der Kondensation von Dämpfen. Da nun staubfreie Luft Kondensation unter gewissen Expansionsverhältnissen zeigt, muß sie ionenführend sein.

I. Teil.

Untersuchung der Orte, wo der Ionisator der gewöhnlichen Luft seinen Sitz haben kann.

Geitels wie auch Wilsons Versuche zeigen uns also in gleicher Weise, daß die Luft in abgeschlossenen Gefäßen ionisiert ist. Es fragt sich nun, welches ist die Quelle dieser Ionisation, und wo hat diese ihren Sitz. — Es ist klar, der Ionisator kann liegen 1. im Innern des Gefäßes, d. h. zwischen, in, bzw. auf den Wänden des Beobachtungsraumes, 2. ganz außerhalb desselben. — Im ersten Falle sind vier Möglichkeiten vorhanden: Von den Wänden des Gefäßes gehen ionisierende Wirkungen aus, bei denen man zunächst an Strahlen denken kann, wie sie von radioaktiven Körpern ausgesandt werden. Dabei kann das Material der Wände a) primär aktiv sein oder b) durch aktive Stoffe verunreinigt worden sein. c) Es können auch infolge des Kontaktes des Gases mit den Gefäßwänden Ionen gebildet werden, so daß das Gas leitend wird. d) Schließlich vermag sich das Gas vielleicht selbst zu ionisieren.

1. Die Ursache der Strahlung liegt im Gefäß.

a) Allgemeine Aktivität der Materie. Der erste Punkt deckt sich mit der subtilen Frage nach der allgemeinen Aktivität der Materie. — Die Frage, ob die Radioaktivität

eine allgemeine Eigenschaft der Materie sei, ist bis heute ganz und gar noch nicht als gelöst anzusehen. War auf der englischen Naturforscherversammlung in Cambridge 1904 die Ansicht, daß alle Materie radioaktiv sei, die prävalierende, so ist sie doch zurzeit sehr ins Schwanken geraten. Es waren wohl hauptsächlich Analogieschlüsse auf Grund des elektrischen und magnetischen Verhaltens der Materie, die zu dieser Annahme geführt haben. Von einem experimentellen Beweise kann zurzeit noch nicht die Rede sein. — Nun sind ja allerdings derartige Untersuchungen infolge der großen Verbreitung der radioaktiven Substanzen ganz besonders schwierig, und obwohl man von den verschiedensten Gesichtspunkten aus an die Frage herantrat, ist doch der Erfolg mit einer Ausnahme stets ein negativer gewesen. Andererseits aber muß man sich vorsehen, auf einen bis jetzt resultatlosen Befund hin die Behauptung zu gründen, daß eine Strahlenemission von gewöhnlicher Materie aus nicht stattfindet. Die Aktivität der radioaktiven Substanzen erkennt man bis jetzt bekanntlich an den Wirkungen 1. der Ionisierung von Gasen, der empfindlichsten aller physikalischen und chemischen Methoden, 2. an ihren Einwirkungen auf die lichtempfindliche Platte oder 3. auf Stoffe, an denen Fluoreszenz erregt wird. — Alle diese Eigenschaften beruhen auf der Aussendung von Strahlen, die erste vornehmlich auf der der α-Strahlen. Wir wissen aber, daß diese α-Strahlen eine äußerst merkwürdige Eigenschaft haben, denn kaum hat eine α-Partikel ein Viertel ihrer Energie verloren, so vermag sie schon nicht mehr das Gas zu ionisieren, noch die anderen genannten Wirkungen auszuüben, und da wir hieran ja gerade seine Existenz erkennen, geht sie unseren Sinnen verloren. — Wie aber, wenn die Materie Strahlen solch geringer Energie im Verlauf ihrer äußerst langsamen Umwandlung aussenden würde? Wir sehen, unsere Beobachtungsmittel reichen bislang noch nicht aus, mit Sicherheit über die Frage der Radioaktivität der Materie zu entscheiden. Auch sind alle Arbeiten, die darauf ausgingen, die von den einzelnen Materialien ausgesandten Strahlungen vermittelst der Ionisierung der Luft zu messen, nämlich die Arbeiten von Righi[6]), Wood[7]), Campbell[8]) u. a., trotz der exaktesten Messungen und des scharfsinnigsten Kalküls eigentlich resultatlos verlaufen. — Auch die Bemühungen Greinachers[9]), Serviss'[10]) und Thwings[11]), mit Hilfe der Wärmeentwickelung gewöhnlicher Materialien den radioaktiven Zerfall zu erkennen, waren ebenfalls vergeblich, und dies negative Resultat ist von ganz besonderem Gewichte, denn

zwischen beiden erwähnten Methoden ist ein prinzipieller Unterschied. Durch Ionisierung der Luft ist die Strahlung unterhalb einer bestimmten Grenze nicht nachweisbar, thermisch aber muß sie nachzuweisen sein. — Nur die eine Ausnahme, auf die wir schon hingewiesen haben, soll nicht vergessen werden; das ist die Aktivität des Kaliums und Rubidiums, wie sie die Arbeiten von Campbell[12]), Wood[13]), Levin[14]), McLennan und Kennedy[15]) u. a. festgestellt haben. Es scheint hier wirklich eine schwache β-Strahlung stattzufinden. Da man nun aus wohlbekannten Gründen einen Gasraum nicht durch ein Alkalimetall abzuschließen pflegt, so kommt für uns die Strahlung dieser Metalle nicht in Betracht. Da also kein Grund vorliegt, eine primäre Aktivität beliebiger Materialien anzunehmen, so ist es ratsam, sie vorderhand nicht zu berücksichtigen und sich zunächst an Erfahrungen zu halten, die durch das Experiment erwiesen sind.

b) Aktive Verunreinigungen. Wir kommen damit zum zweiten Punkt, zur Verunreinigung der Wände des Versuchsgefäßes durch die bekannten radioaktiven Elemente. Daß dies bei der ungeheuren Verbreitung radioaktiver Stoffe, die ja durch zahlreiche Autoren in den verschiedensten Erdteilen bestätigt ist, leicht denkbar ist, liegt auf der Hand. Wer bürgt dafür, daß das Wandmaterial auf seinem langen Lebenswege nicht mit radioaktiven Substanzen in Berührung gekommen ist, sei es schon im Schoße der Erde, sei es bei seiner Verhüttung oder Bearbeitung. Es kommt bei dem radioaktiven Verhalten eines Stoffes ganz auf seine Vorgeschichte an. McLennan[16]) sagt in einer seiner Arbeiten, daß, falls man alle äußeren Einflüsse vorsichtig ausschließt, sich alle Substanzen inaktiv erweisen müßten. Hat man auch bei vielen Stoffen eine radioaktive Verunreinigung noch nicht positiv, eben des überaus geringen Betrages wegen, nachweisen können, so ist dies doch den eingehenden, exakten Untersuchungen Elsters und Geitels[17]) beim Blei gelungen, und so wurde dies Element aus der Reihe der radioaktiven Substanzen ausgeschlossen, in die es häufig mit noch anderen gerechnet wurde. — Die beiden Wolfenbütteler Physiker schieden zunächst auf chemischem Wege die aktive Substanz von dem indifferenten Blei ab. Dann wurde die Halbierungskonstante der aktiven Substanz bestimmt; sie erwies sich als die des Radiums F. Ebenfalls zeigte auch die Bestimmung des Ionisierungsbereiches der gewonnenen aktiven Substanz, daß man es mit Radium F zu tun hatte. — Abgesehen von diesen Verunreinigungen, die das Material entweder schon aus der Erde mit sich bringt

oder durch Berührung mit aktiver Substanz aufnimmt, kann auch der bloße Kontakt mit der Luft dasselbe schon radioaktiv machen, denn die Luft führt immer Emanationen radioaktiver Elemente mit sich, die dann die induzierte Aktivität bilden. Diese schlägt sich auf den Wänden unseres Gefäßes nieder und trägt so zur Ionisierung des Gases im Innern bei. Obwohl sich diese Induktionen auf mechanischem Wege leichter oder schwieriger entfernen lassen, ist die daraus entspringende Fehlerquelle nicht zu unterschätzen. Besonders die schnell abklingenden Induktionen können bisweilen sehr störend wirken. — Außer diesen ionisierend wirkenden Induktionen ist die Luft im Innern selbst, da sie ja Emanation in sich birgt, ionisiert. Da nun letztere aber ihre Aktivität mit der Zeit verliert, so muß die durch sie hervorgerufene Ionisierung in hermetisch abgeschlossenem Raume allmählich verschwinden. Ein Versuch, der von Elster und Geitel mit mehreren Kubikmetern ruhender Luft angestellt wurde, bestätigte dieses. Die Luft selbst enthält daher keine dauernd radioaktiven Bestandteile.

Durch die Verunreinigung der Gefäßwände durch radioaktive Substanzen kann auch eine Beobachtung Elsters und Geitels[18]), die von Mc Lennan[19]), Mache[20]) u. a. wiedergefunden wurde, leicht erklärt werden. Es ist dies die Zunahme der Leitfähigkeit abgeschlossener Gasräume im Laufe der Zeit bis zu einem bestimmten Grenzwerte. Manchen Autoren ist die Wiederholung dieser Versuche nicht gelungen. Das kann zunächst daran liegen, daß die Steigerung der Leitfähigkeit zu gering war, um erkannt zu werden, sodann aber auch an der Reinheit des Wandmaterials von radioaktiven Substanzen. Besonders fällt auf, daß diese Zunahme der Leitfähigkeit bei Zinkgefäßen nicht beobachtet wurde. Vielleicht hängt diese Reinheit des Zinks vom Radium mit der technischen Gewinnung des Metalls, nämlich durch Destillation, zusammen. Elster und Geitel verwandten Glas, Mc Lennan dagegen Blei. Glas und Blei sind aber Materialien, die recht wohl den Verdacht einer Radiuminfektion erwecken können. Versuche, die ich in dieser Richtung angestellt habe, bestätigten dies. Während ein Zinkgefäß nahezu denselben Wert der Ionisation im Durchschnitt zeigte, gleichgültig, ob die Luft in ihm gealtert oder ganz frisch war, oder ob sie zur Kondensation der in ihr enthaltenen Emanation durch ein mit flüssiger Luft gekühltes Rohr getrieben war, ergaben Versuche mit einem inwendig versilberten, zugleich kleineren Glasgefäß eine deutliche Zunahme der Ionisation mit der Zeit, die allerdings schon nach drei Tagen den Grenzwert erreicht hatte. Zugleich war die

Ionisation in dem Glasgefäße erheblichen Unregelmäßigkeiten unterworfen.

c) Chemische Wirkungen. Eine fernere Ursache der Ionisation in geschlossenen Gefäßen könnte man in einer langsam vor sich gehenden chemischen Einwirkung des eingeschlossenen Gases auf die Gefäßwände suchen. Aber abgesehen davon, daß schon die Beobachtungen Pattersons[21]), vornehmlich aber Wilsons[22]), nach denen die chemische Natur der Gase ohne Einfluß auf die Ionisation ist, falls man ihr Absorptionsvermögen in genügender Weise berücksichtigt, dieser Annahme widersprechen, hat man bis jetzt noch keine experimentellen Belege für eine Ionisation der Luft durch Oxydation von Metallen und anderen Substanzen gefunden, abgesehen von der des Phosphors und vielleicht auch reiner Oberflächen der Alkalimetalle[5]). Beim Phosphor steht ohne Frage fest, daß die Leitfähigkeit des Gases durch die Bildung von Ionen beider Vorzeichen bedingt ist.

d) Die Ionisierung eine allgemeine Eigenschaft der Gase. Es bliebe uns als vierter Punkt zur Diskussion noch übrig das Gasinnere selbst. Vermag vielleicht die im Innern des Gefäßes stagnierende Luft sich selbst zu ionisieren? Ist also die spontane Ionisierung eine allgemeine Eigenschaft der Gase? Als Elster und Geitel[23]) sich diese Frage vorlegten, dachten sie zunächst an eine bis dahin unbekannte Fähigkeit abgeschlossener Luftvolumina, eine Art radioaktiver Emanation zu bilden, die dann wieder ionisierend auf das Gas wirkte. Der oben schon erwähnte Versuch der beiden Autoren, der mit einem größeren Luftquantum angestellt wurde, das mehrere Wochen lang in einem Dampfkessel eingeschlossen war, widersprach dieser Auffassung. Es ließ sich nicht eine Spur einer Emanation in bekannter Weise nachweisen.

Ein anderer Gedanke wäre der, daß man in der normalen Ionisierung ein dem gasförmigen Zustande auch bei gewöhnlicher Temperatur (0^0—20^0) zukommendes Merkmal erblickte, das unzertrennbar von ihm etwa dadurch verursacht würde, daß diejenigen Gasmoleküle, deren Geschwindigkeit oberhalb einer bestimmten Grenze liegt, beim Zusammenstoß mit anderen aus diesen Elektronen abspalten und so zur Ionenbildung Anlaß gäben. — Wenn diese Annahme zu Recht bestände, so müßte die Temperatur eines Gases von erheblichem Einfluß auf seinen Ionengehalt sein. Daß die Ionisierung aber keine Funktion der Temperatur ist, zeigen uns die Versuche Maches[24]) und Pattersons[25]). Mache gelangte zu diesem Resultate, indem er eine Glasglocke in ein Wasserbad tauchte

und die Zerstreuung für Temperaturen von 14 bis 62° bestimmte. — Patterson steigerte in einem Metallgefäß die Temperatur eines Gases, das auf konstantem Druck gehalten wurde, auf 520°. Bis 450° zeigte sich die Unabhängigkeit der Ionisation von der Temperatur, von da an aber stieg sie sehr schnell, weil die glühenden Gefäßwände ihren ionisierenden Einfluß auf das Gas geltend machten; außerdem trat auch der unipolare Charakter der Ionenbildung an heißen Metallmassen bei der Ionisation hervor. — Des weiteren arbeitete M. Clung[26]) mit einem gegebenen Volumen eines Gases, das auf konstanter Dichte erhalten wurde, und das durch Röntgenstrahlen von gegebener Intensität ionisiert wurde. Die Größe der Ionisierung zeigte sich auch hier unabhängig von der Temperatur. Man erhielt durch gesteigerte Temperatur nicht eine Spur einer stärkeren Ionisation des bereits ionisierten Gases.

Gegenüber diesem negativen Befunde ist es vielleicht doch nicht ohne Interesse, zwei plausible Annahmen über diejenigen Geschwindigkeiten der Luftmoleküle einzuführen, die etwa ausreichen würden, Ionisierung durch Stoß zu bewirken. Aus den praktischen Erfahrungen mit dem Lichtbogen glaubt Stark[27]) annehmen zu dürfen, daß oberhalb einer Temperatur von ungefähr 4000° das Gas spontan leitend wird. Wir setzen einmal voraus, daß das Gas von einer Temperatur von 4000° an spontan freie Ionen enthält, und nehmen an, daß diese beim Zusammenstoß der Gasmoleküle, die sich mit der dieser Temperatur zukommenden mittleren Geschwindigkeit bewegen, erzeugt werden. Da nun auch bei 0° ein Gas nach dem Maxwellschen Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung im Kubikzentimeter eine gewisse Anzahl von Molekülen enthält, die eine der mittleren Geschwindigkeit bei 4000° gleiche oder sie übertreffende besitzen, so wollen wir feststellen, wie groß deren Zahl ist, um zu sehen, ob sie ausreicht, die normale Ionisierung eines Gases bei 0° zu erklären.

Nach dem Maxwellschen Gesetz ist bekanntlich die Anzahl der mit Geschwindigkeiten zwischen den Grenzen a und b behafteten Gasmoleküle in der Volumeneinheit:

$$\frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_a^b x^2 \,.\, e^{-x^2} \,.\, dx,$$

wo N die Loschmidtsche Zahl ($21 \,.\, 10^{18}$) und x die Geschwindigkeit bezeichnen. Als Einheit der Geschwindigkeit ist die mittlere Geschwindigkeit für den Gefrierpunkt gewählt

(also 485 m für Luft im Mittel). Setzt man für a die mittlere Geschwindigkeit der Luftmoleküle bei 4000° ein, also

$$a = 485\sqrt{\frac{4272.6}{272.6}} \sim 4$$

und $b = \infty$, so erhält man offenbar die Anzahl der Moleküle, die im Kubikzentimeter der Luft normalen Drucks und der Temperatur 0° eine Geschwindigkeit besitzen, welche die mittlere von 4000° übertrifft.

Zur genäherten Berechnung des Integrals schließem wir es in Grenzen ein. — Wir schreiben zunächst:

$$E = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_a^\infty x^2 . e^{-x^2} . dx.$$

Es ist nun, solange $a > 1$ ist,

$$E < \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_a^\infty x^3 . e^{-x^2} . dx.$$

Die Voraussetzung, daß $a > 1$ ist, trifft hier zu, da $a \sim 4$ ist. — Das letzte Integral läßt sich mit Hilfe der partiellen Integration berechnen. Nach Einführung der Grenzen ergibt diese:

$$\frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_a^\infty x^3 . e^{-x^2} . dx = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{2} \cdot e^{-a^2} (a^2 + 1)\right]_{a \sim 4}$$

also:

$$E < 46 . 10^{12}.$$

Ferner ist nun:

$$E > \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_a^\infty x . e^{-x^2} . dx,$$

wenn $a > 1$ ist. Der Wert des letzteren Integrals beträgt nach Einführung der Grenzen:

$$E > \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot e^{-a^2}\right]_{a \sim 4}$$

$$E > 27 . 10^{11}.$$

Die Anzahl E der gesuchten Moleküle ist also zwischen den Grenzen

$$4{,}6 . 10^{13} > E > 2{,}7 . 10^{12}$$

eingeschlossen.

Nun enthält die Luft normalen Drucks und von der Temperatur 0^0 eine Ionenzahl im Kubikzentimeter, die zwischen 500 bis 4000 liegt. Nehmen wir an, daß auf jedes der Luftmoleküle, das sich mit größerer Geschwindigkeit bewegt, als es der mittleren Geschwindigkeit für 4000^0 entspricht, nur ein durch Stoß erzeugtes freies Ion käme, so würden im Kubikzentimer etwa 10^{13} Ionen enthalten sein. Diese Zahl ist sicher mehr als 10^9 mal so groß als die beobachtete. Es führt also unsere Annahme, daß die normale Ionisierung der Luft aus ihrem Gehalt an Molekülen entspringt, die über 4000^0 temperiert sind, zu einem unmöglichen Resultat.

Nun ist aber andererseits ein Fall bekannt, bei dem nachweislich durch den Stoß bewegter Gasmoleküle Elektronen abgespalten werden, nämlich durch die α-Strahlen der radioaktiven Substanzen, die ja nichts als positiv geladene bewegte Heliumatome sind. Hier existiert eine scharfe Grenze der Geschwindigkeit, unterhalb welcher die ionisierende Wirkung der Teilchen, wie bereits erwähnt, erlischt. Rutherford hat gefunden, daß diese Grenze bei $1{,}5 \,.\, 10^9$ cm/sec liegt, oder wenn wir die Geschwindigkeit von 485 m wie oben als Einheit wählen, ist sie $3 \,.\, 10^4$. Vielleicht enthält die Luft gewöhnlicher Temperatur genügend viel so schnell und schneller bewegte Moleküle, so daß hieraus ihre natürliche Ionisierung entspringt. Wir schließen für diese untere Grenze von $3 \,.\, 10^4$ das oben berechnete Integral in gleicher Weise in Grenzen ein:

$$E = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_{3 \,.\, 10^4}^{\infty} x^2 \,.\, e^{-x^2} \,.\, dx$$

$$E < \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_{3 \,.\, 10^4}^{\infty} x^3 \,.\, e^{-x^2} \,.\, dx$$

$$E < \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{2} \cdot e^{-9 \,.\, 10^8} \{ 9 \,.\, 10^8 + 1 \} \right]$$

$$E < \frac{4}{\sqrt{\pi} \,.\, 10^{3\,999\,999\,973}} \sim 0.$$

Ebenso wird:

$$E > \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_{3 \,.\, 10^4}^{\infty} x \,.\, e^{-x^2} \,.\, dx$$

$$E > \frac{4 \,.\, 2}{\sqrt{\pi} \,.\, 10^{3\,999\,999\,91}} \sim 0.$$

In diesem Falle erhält man also einen überaus geringen Betrag. Es ist daher absurd, etwa anzunehmen, daß die natürliche Ionisierung der Luft auf den Stoß derjenigen Moleküle zurückzuführen sei, die sich mit größerer Geschwindigkeit bewegen als die α-Teilchen der radioaktiven Stoffe am Ende ihrer Reichweite. — Freilich haben wir von der positiven Ladung des α-Teilchens ganz abgesehen und nur die Geschwindigkeit desselben in Betracht gezogen. Wenn aber der positiven Ladung des α-Teilchens beim Ionisierungsprozeß noch eine besondere Rolle zukäme, so würde unser Schluß um so mehr Gültigkeit haben.

2. Die Ursache der Strahlung liegt außerhalb des Gefäßes.

Für eine Ionisationsquelle innerhalb oder auch auf den Wänden des Untersuchungsraumes spricht nach diesen Überlegungen nur der mit *b* bezeichnete Punkt, die radioaktive Verunreinigung. — Aber allein kann sie für die Ionisierung der Luft in einem abgeschlossenen Gefäß auch nicht herangezogen werden, denn umgibt man den geschlossenen Untersuchungsraum mit einem Mantel aus Blei oder Wasser, so geht die Elektrizitätszerstreuung im Innern des Meßgefäßes merklich zurück, und zwar um so mehr, je dicker der Mantel gewählt wird, allerdings nur bis zu einer bestimmten Dicke. — Dieser Versuch, der von Cooke[28]) zuerst angestellt wurde, beweist, daß wir die Quelle der ionisierenden Strahlen zum Teil in der weiteren Umgebung des Versuchsgefäßes zu suchen haben; etwa in der Erde, in der Luft und in den Körpern, die auf dem Erdboden sich befinden. Daß diese Strahlen durch dicke Schichten Blei hindurchdringen, zeigt uns ferner, daß wir es mit einer sehr durchdringenden Strahlung zu tun haben, die sich etwa mit der γ-Strahlung oder mit harten Röntgenstrahlen vergleichen läßt. Da nun beide Strahlenarten, wenn sie durch eine Substanz hindurchgehen, diese veranlassen, ihrerseits wieder sekundäre Strahlen auszusenden, so müssen wir die Ionisierung der Luft in abgeschlossenen Gefäßen zum Teil der primär wirkenden durchdringenden Strahlung, zum Teil aber auch den Sekundärstrahlen zuschreiben. — Der dritte Teil der vorliegenden Arbeit wird uns näheren Aufschluß über das Verhalten dieser durchdringenden Strahlung geben.

II. Teil.

Herkunft der Strahlen.

Suchen wir zunächst nach der Herkunft dieser von Cooke gefundenen Strahlung, so liegt es nahe, in ihr die γ-Strahlen zu vermuten, die von Radium C, Thorium C und ev. vom Aktinium C ausgesandt werden. — Daß die von diesen Körpern ausgesandte Strahlung überall existieren muß, ist durchaus verständlich, wenn man bedenkt, daß in der Erde Hunderte von Tonnen radioaktiver Substanzen verbreitet sind. Wie Elster und Geitel, Strutt, Eve, Joly u. a. gezeigt haben, führt jedes Gestein, jede Bodenart, jedes Wasser, ob See- oder Binnenwasser, eine gewisse Menge radioaktiver Substanzen mit sich. Summiert man diese so geringen Mengen über unseren ganzen Planeten, so ergibt sich jene gewaltige Masse radioaktiver Substanzen. Durch die Poren des Bodens dringt die Emanation in die Atmosphäre; überall, wo auch immer diese untersucht ist, ob auf der See, ob auf den Kontinenten, ob hoch oben über der Erde im Ballon oder auf dem Boden selbst, findet sie sich vor. Dort aber, wo die Emanation ist, existieren auch alle ihre Zerfallsprodukte, und zwar die ganze Reihe derselben, sowohl kurz- wie langlebige. Auch sie sind je nach der Größe ihrer Halbierungskonstanten in größerer oder geringerer Menge im Luftmeere wie auf dem Erdboden nachgewiesen. — Es ist hier nicht der Ort, auf die Radioaktivität der Erde und die der Atmosphäre näher einzugehen; ich verweise auf die inzwischen erschienenen Lehrbücher von Gockel, Mache und von Schweidler[29]) mit ihren zahlreichen, wohlgeordneten Literaturverzeichnissen, besonders aber auf die Spezialabhandlungen von Elster und Geitel, Strutt, Eve, Mc Lennan, Boltwood, Burbank, Blanc, Joly, Flemming u. a. Nur eine kurze Übersicht der neuesten Daten über das Vorkommen des Radiums und Thoriums — denn diese kommen für uns nur in Frage — soll gegeben werden (s. folg. Tab.).

Gleichgültig für unsere Betrachtungen ist die Frage, ob die radioaktiven Substanzen wesentlich gleichförmig durch die Erdmasse verteilt sind, oder ob sie nur den oberen Schichten angehören; denn es ist klar, daß für die durchdringende Strahlung, die durch die Erdmassen stark absorbiert wird, doch nur der radioaktive Gehalt einer verhältnismäßig dünnen Erdkruste (kaum ein Meter nach Eve) in Betracht kommen kann. — Nach den Berechnungen Elsters und Geitels, denen die experimentellen Daten Strutts zugrunde liegen,

Radium	Strutt[30])	Joly[31])	
Eruptivgestein .	$\begin{cases} 4{,}0 \times 10^{-12}\,g \\ 1{,}7 \times 10^{-12}\,g \end{cases}$	$7{,}7 \times 10^{-12}\,g$	im Gramm Gestein
Sedimentgestein .	$1{,}1 \times 10^{-12}\,g$	$\begin{cases} 4{,}9 \\ 3{,}4 \end{cases} \times 10^{-12}\,g$	im Gramm Gestein
Meerwasser . .	$20 \times 10^{-16}\,g$	$\begin{cases} 170 \\ 280 \end{cases} \times 10^{-16}\,g$	im Gramm Meerwasser
Tiefseesedimente		$\begin{cases} 3{,}1 \\ 54{,}5 \end{cases} \times 10^{-12}\,g$	im Gramm Gestein

Thorium	Blanc[32])	Joly[31])	
Eruptivgestein .	$\begin{cases} 8{,}28 \\ 6{,}30 \\ 3{,}14 \\ 2{,}04 \end{cases} \times 10^{-5}\,g$	$\begin{cases} 1{,}85 \\ 1{,}18 \end{cases} \times 10^{-5}\,g$	im Gramm Gestein
Sedimentgestein .	$1{,}45 \times 10^{-5}\,g$	$\begin{cases} 0{,}97 \\ 9{,}51 \end{cases} \times 10^{-5}\,g$	im Gramm Gestein

ist allein schon die gesamte Menge des Radiums im Erdkörper 7 bis 100 mal so groß, als es zur Herstellung des thermischen Gleichgewichts der Erde erforderlich wäre. Falls dieses, was bis jetzt allgemein angenommen ist, annähernd besteht, so können die radioaktiven Substanzen nicht gleichmäßig durch die ganze Erde verteilt sein, sondern sie sind auf eine Kugelschale beschränkt, deren Dicke zwischen 20 bis 300 km gefunden wird, je nach der für den mittleren Gehalt des Gesteins an radioaktiver Substanz der Berechnung zugrunde gelegten Zahl.

III. Teil.

Spezialuntersuchungen der Strahlen.

1. Überblick über die von anderen Autoren angestellten Untersuchungen.

a) Methode der Verdichtung der Luft. Wir wenden uns nun der besonderen Betrachtung der durchdringenden Strahlung zu, und zwar den Methoden, die uns näheren Aufschluß über dieselbe geben, d. h. uns ihre Eigenschaften, besonders ihre Größe und Richtung, erkennen lassen.

Die eine Methode besteht darin, daß man ein bestimmtes Volumen verschieden dichter Gase oder auch desselben Gases unter verschiedenen Drucken durch ein Metallgefäß gegen den Außenraum vollständig abschließt und den Sättigungsstrom innerhalb desselben in bekannter Weise mißt. Je dichter das Gas, um so größer ist c. p. der Sättigungsstrom. Diese Proportionalität zwischen Gasdichte und Stromstärke zeigt an, daß die Menge der gebildeten Ionen durch die Zahl der von den Strahlen getroffenen Gasmoleküle bestimmt ist, eine merkliche Absorption der Strahlen im Gase also nicht stattfindet. Die Strahlen sind demnach stark durchdringend. Dabei ist indessen zu beachten, daß sie an den Metallwänden des Gefäßes in der schon erwähnten und noch eingehender zu besprechenden Weise modifiziert werden.

Versuche in dieser Richtung, bei denen zum Vergleich auch die Wirkungen der Röntgen- und Radiumstrahlen auf das abgeschlossene Gasquantum unter denselben Bedingungen herangezogen wurden, haben bewiesen, daß die von außen kommende Strahlung sich ihrer durchdringenden Kraft nach mit den härtesten Röntgenstrahlen oder den steifsten γ-Strahlen des Radiums C, Thoriums C und Aktiniums C vergleichen läßt. Es gehören hierher die Arbeiten von C. T. R. Wilson[33]), Jaffé[34]), Patterson[35]), McLennan und Burton[36]) und W. Wilson[37]). — C. T. R. Wilson und Jaffé arbeiteten mit verschiedenartigen Gasen, der letztere z. B. bei einer Versuchsreihe u. a. mit Nickelkarbonyl, das 5,6 mal so dicht wie Luft ist. Er fand in diesem Gase die Ionisierung 5,1 mal so groß wie in Luft, also dieselbe etwa proportional der Dichtigkeit. — Zu demselben Resultat gelangten auch die übrigen Autoren, indem sie Luft unter verschiedenen Drucken untersuchten, nur Patterson nicht. Während Wilson den Druck von 44 bis 743 mm wählte, beobachtete McLennan bis 7 Atmosphären und W. Wilson sogar bis 40 Atmosphären. Immer wurde die Ionisierung der Luft im großen und ganzen als eine nahezu lineare Funktion des Druckes erhalten. Patterson arbeitete bei einem Quecksilberdruck von 20 bis 300 mm. Die Ionisation wächst nach ihm zunächst, nimmt dann aber bei weiterer Drucksteigerung einen Grenzwert an, als wenn die Energie der Strahlung schon vollständig von dem Gase aufgenommen wäre. Dies Ergebnis läßt sich schwer verstehen, denn bei dieser geringen Dichtigkeit ist es ganz ausgeschlossen, daß schon eine vollständige Absorption der sehr durchdringenden Strahlung eingetreten wäre. Tatsächlich fand McLennan, der bis 7 Atm. hinaufging, keine Abweichung von der linearen Be-

ziehung. — Ein merkwürdiges Verhalten zeigte sich dagegen, als W. Wilson den Druck auf 40 Atm. steigerte. Wilson bestimmt in seinen Versuchen mit verdichteter Luft zuerst die Abhängigkeit der Ionisierung von der Dichtigkeit mit Hilfe der γ-Strahlen des Radiums. Er erhält eine Kurve, die konkav zur Druckachse verläuft. Er interpretiert dieses Verhalten in folgender Weise: Der Anteil der γ-Strahlen des Radiums, die überhaupt in das Ionisierungsgefäß, das von 3 cm dicken Eisenwänden eingeschlossen ist, eindringen, muß sehr durchdringend sein. Der von ihm herrührende Teil der Ionisierung ist daher proportional der Gasdichte, da eine nennenswerte Absorption auch in der stark verdichteten Luft nicht eintritt. Zu gleicher Zeit erregen diese primären γ-Strahlen aber auch eine leicht absorbierbare Sekundärstrahlung an den Gefäßwänden. Die Ionisierung, welche von diesen Strahlen herrührt, wird mit wachsender Dichte einen Grenzwert erreichen, nämlich dann, wenn diese Sekundärstrahlen von der verdichteten Luft vollkommen absorbiert sind. Da nun die am Elektroskop beobachtete Ionisierung sich aus diesen beiden Teilen, der Primär- und Sekundärstrahlung, zusammensetzt, so kann sie im ganzen nicht der Dichte proportional werden, sondern sie muß langsamer wachsen. — Nach dieser Feststellung des Verhaltens der Radiumstrahlen wird nun der entsprechende Versuch von Wilson allein für die natürliche Ionisierung gemacht. Zunächst zeigt sich auch hier der Schirmeffekt des Kompressionsgefäßes gegenüber der durchdringenden Strahlung. Als nämlich das Elektroskop mit seinem Ionisationsraum in das 3 cm starke eiserne Kompressionsgefäß gesetzt wurde, sank zunächst die Ionisierung bei normalem Druck bis auf 40 Proz. Wir werden auf diesen Effekt auf den nächsten Seiten zurückkommen. Nachdem also nur noch 60 Proz. der natürlichen Ionisation übrig sind, wird jetzt die Luft komprimiert. Es zeigt sich nun ein Ansteigen proportional dem Druck, also ein Verhalten, das ganz verschieden ist von dem, wie es bei der Anwendung der γ-Strahlen des Radiums erhalten wurde. Wilson schließt daher, daß die Erklärung des Verhaltens für diesen Rest von 60 Proz. der natürlichen Zerstreuung nur zu sehr kleinem Teile noch in einer durchdringenden Strahlung gesucht werden könne. Er schiebt die Hauptursache auf die Emanation, die von den geringen Spuren des Radiums herrührt, die in dem Gefäß, aus dem die Luft entnommen ist, an den Wänden haften. Er berechnet, daß die zur Erzeugung dieser Wirkung nötige Menge so klein ist, daß es hoffnungslos wäre, sie durch Reinigen des Gefäßes los zu werden. Ihre Wirkung

zeigt sich erst deutlich bei höherem Druck, da sie eben der Menge der eingepreßten Luft proportional ist. Die von ihr ausgehende Wirkung stellt also eine Störung dar, von der man sich nicht befreien kann, und die die zu erwartende Übereinstimmung zwischen den durch γ-Strahlen vom Radium und den durch die durchdringende Strahlung bestimmten Kurven zunichte macht. Aus Wilsons Versuchen geht also, wie aus denen der übrigen genannten Forscher, die Existenz einer Strahlung hervor, die von sehr durchdringendem Charakter ist. Wilson bemerkt, wie jene, die schirmende Wirkung des Kompressionsgefäßes, ist aber außerstande, aus dem verbliebenen Reste von Leitvermögen die durchdringende Strahlung von der störenden Wirkung der Emanation, die in der Luft enthalten ist, zu trennen. — Anzunehmen ist, daß, falls Wilson durch flüssige Luft oder Kohle die Luft vor der Kompression von jeder Spur Emanation hätte befreien können, er sicherlich eine Konformität der beiden Ionisationskurven für die γ-Strahlung des Radiums und die durchdringende Strahlung erzielt haben würde.

Die Methode, unter Veränderung der Gasdichte die allgemeine durchdringende Strahlung mit der des Radiums zu vergleichen, bietet also, wie wir sehen, gewisse Schwierigkeiten, die noch nicht überwunden sind.

b) Schirmmethode. Eine zweite Methode besteht nun darin, daß man die durchdringende Strahlung durch sie absorbierende Substanzen, mit denen man das Versuchsgefäß teils oder ganz umgibt, so weit wie möglich in bekannter Weise zu schwächen sucht. Cooke[28]) und zugleich McLennan und Burton[38]) waren die ersten, die in dieser Weise die Wirkung der durchdringenden Strahlung deutlich nachwiesen. — Cooke benutzte zu seinen Versuchen ein Elektroskop vom Wilson-Typus, wie es häufig bei den radioaktiven Messungen verwandt wird. Das Messinggehäuse desselben war mit 2 mm dicken Wänden nach außen hermetisch abgeschlossen. Das Gasvolumen betrug 1100 ccm. Wurde nun das Gefäß vollständig von Bleischirmen umschlossen, so sank die Ionisation im Elektroskop. Dabei kamen Schirme verschiedener Dicke (von 1 mm bis 40 cm) zur Verwendung. Es zeigte sich, daß die Intensität der Ionisation im allgemeinen bei zunehmender Stärke des umgebenden Mantels abnahm. Bei einem 1 cm starken Bleischirm war sie halb so stark wie bei einem solchen von 0,5 cm Stärke. Bei 5 cm Dicke desselben erreichte die Ionisationsabnahme ihr Maximum, und zwar betrug dieselbe über 33 Proz. Von hier an trat keine weitere Abnahme mehr ein, selbst als

das Versuchsgefäß mit 10500 Pfund Blei umgeben war. Cooke prüfte dann noch andere Materialien auf ihre Schirmwirkung. Je dichter die Substanzen waren, um so stärker war die Absorption der Strahlung. Diese zeigte also dieselbe Eigenschaft wie die γ-Strahlung des Radiums. Eisen, Wasser, Holz wurden als Schirme verwandt, immer zeigte sich ihr absorbierender Charakter. Sobald aber als Umhüllung des Versuchsgefäßes Ziegelsteine dienten, die in einem Falle einen Stein, im anderen vier Steine breit gelegt wurden, stieg die Ionisation auf 40 bis 50 Proz., je nach der Dicke der Steine. Dieses Verhalten läßt sich sehr leicht erklären. Ziegelsteine bestehen aus gebranntem Ton. Nach Elsters und Geitels Untersuchungen führen nun gerade die Tone verhältnismäßig viel Radium. Die Wände des Steinschirmes absorbieren zwar einen Teil der durchdringenden Strahlung, aber infolge ihres eigenen Radiumgehaltes wird der absorbierte Teil der Strahlung durch die Eigenstrahlung kompensiert und im besonderen Falle, wie in diesem, noch übertroffen.

McLennan und Burton arbeiteten mit einem siebenmal größeren Gefäß als Cooke, das aus verzinktem Eisenblech hergestellt war. Wurde der Metallzylinder mit einer Wasserschicht von 25 cm umgeben, so nahm die Ionisation um 37 Proz. ab. Auf McLennans Veranlassung nahm dann Burton[39]) diese Versuche nochmals auf. Er umschloß den oben erwähnten Apparat mit Wasserschichten verschiedener Dicke. Seine Resultate waren folgende:

Dicke der Wasserschicht	Abnahme der Ionisation
10,4 cm	11,9 Proz.
29,0 cm	15,9 Proz.
60,0 cm	32,4 Proz.

Ähnliche Daten erhielten Gockel und Wulf[40]), als sie ihren Apparat mit Wasserschirmen umgaben. — Nimmt man die durchdringende Strahlung als γ-Strahlung an, rechnet nach dem Absorptionsgesetze:

$$J = J_0 \cdot e^{-\lambda x},$$

setzt $\lambda = 0{,}04$ und berücksichtigt die Sekundärstrahlung an den Metallwänden des Versuchsgefäßes, so erhält man:

Dicke der Wasserschicht	Abnahme der Ionisation
10 cm	11 Proz.
60 cm	30 Proz.

Aus diesen Zahlen erkennt man, daß die durchdringende Strahlung identisch mit der γ-Strahlung des Radiums ist, die

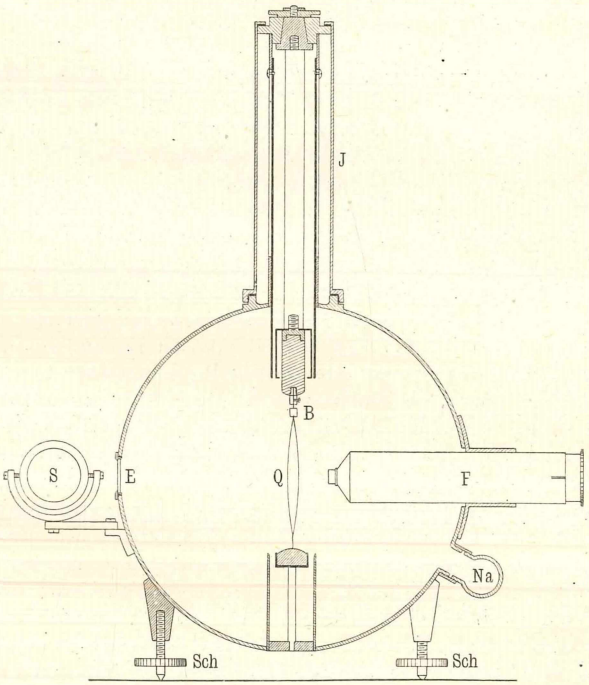
gefundenen Abnahmen entsprechen nämlich dem Absorptionskoeffizienten des Wassers für jene Strahlen.

Diese Schirmeffekte von Metallen und anderen Materialien gegenüber der durchdringenden Strahlung wurden von Elster und Geitel[41]), Gockel[40]) und Wulf[42]), McLennan[43]) und Wright[44]) an Schirmen bestätigt, wie sie uns die Natur in gewaltigen Ablagerungen vieler inaktiver Substanzen bietet. Versuche C. T. Wilsons[45]) und auch einige andere von Gockel und Wulf[40]) und Wright[44]) führten scheinbar zu einem entgegengesetzten Resultat. — Wilson brachte seine Ionisationsgefäße in einen Eisenbahntunnel. Statt der erwarteten Abnahme aber trat eine Vergrößerung der Leitfähigkeit der Luft im Versuchsapparat ein. Wir sehen genau dieselbe Erscheinung wie bei Cookes Experimenten mit Ziegelsteinschirmen. Die aktiven Felsmassen, die den Tunnel umgaben, hatten eben eine gewisse Eigenstrahlung, die ihre Schirmwirkung verdeckte oder übertraf. Gockel und Wulf fanden im Simplontunnel an einem vollständig abgeschlossenen Zinkzylinder, daß die Ionisierung der in ihm enthaltenen Luft sogar zweimal so groß wie an anderen Orten außerhalb des Tunnels war. — Wright erhielt oberhalb und innerhalb des Tunnels der Ontario Power Co. dieselben Werte der Ionisation. — Elster und Geitel benutzten als Schirme die Steinsalzlager, die in der Nähe von Wolfenbüttel vorhanden sind. Sie gingen bei ihren Versuchen von der Wahrnehmung aus, daß viele reine Mineralien, wie Quarz, kohlensaurer Kalk, Baryt, Steinsalz, an ihrem als Zerstreuungsapparat bekannten Instrumente nicht die geringste Spur eigener Aktivität zeigten. Da also die Eigenstrahlung dieser Substanzen als sehr klein anzunehmen ist, bieten sie da, wo sie sich in genügend dicken Schichten finden, ausgezeichnete Schirme zur Absorption der von den anderen aktiven Gesteinsmassen ausgehenden durchdringenden Strahlung. — Beobachtet wurde von den beiden Forschern in einem 330 m tief in reinem Steinsalz liegenden Raume mit einem Apparate, der aus einem hermetisch abgeschlossenen Ionisationsraume mit daran befestigtem Exnerschen Elektroskop bestand. Der erstere war ein Aluminiumzylinder von 1893 ccm Inhalt. — Das Resultat der Beobachtung war, daß die Ionisierung durch die Schirmwirkung des Steinsalzes etwa um 28 Proz. vermindert wurde.

Wulf konstruierte für seine Untersuchungen über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit ein besonderes Instrument (Fig. 1), das vor den von anderen Seiten benutzten Apparaten wesentliche Vor-

züge hat. Die Kapazität des ganzen Apparates ist dadurch, daß die Fäden des Elektrometers zugleich als Zerstreuungskörper verwandt werden, außerordentlich gering. Sie beträgt nur 1,2 cm. Dadurch kann, ohne daß die Empfindlichkeit der Messung herabgedrückt würde, die Ionisationskammer in ihren Dimensionen beschränkt werden. Sie hat nur einen Inhalt

Fig. 1.



B Bernstein, *S* Spiegel,
F Fernrohr, *E* Fenster,
J Isolationsvorrichtung, *Na* Natriumtrocknung,
Q Quarzfäden, *Sch* Fußschrauben.

von 2700 ccm. Infolgedessen läßt sich das ganze Instrumentarium leicht und ohne Gefahr transportieren; ein weiterer Vorteil besteht darin, daß man sich ohne Mühe durch eine sinnreiche Einrichtung vom Isolationsvermögen des Instrumentes überzeugen kann. Die Nachteile des Instrumentes bestehen meiner Meinung nach in der Schwierigkeit, eine völlige Abdichtung zu erreichen. Ob nämlich bei starken Luftdruck-

änderungen und Temperaturschwankungen, die ja bei diesen bald im Freien, bald in gedeckten Räumen, bald in den verschiedensten Höhen auszuführenden Messungen unvermeidlich scheinen, das Luftvolumen wirklich hermetisch abgeschlossen ist, ist bei der Einrichtung des Apparates, mit Hilfe eines Mikroskopes die Divergenz der Fäden abzulesen, doch noch sehr fraglich; denn wenn auch wirklich die Isolationsvorrichtung und Schlitteneinrichtung des Mikroskopes gut dicht halten sollte, ist doch die Abdichtung der Linsen ganz besonders schwierig.

Mit diesem Instrumente stellte Wulf Versuche in Kreidehöhlen an, die in der Nähe Valkenburgs (Holland) inmitten der Mastrichter Kreideformation gelegen sind. Es zeigte sich eine enorme Abnahme der Zerstreuung, und zwar zwischen 40 bis 43 Proz., während die Dicke der Deckenschicht 15 m betrug. Die Größe der Abnahme entspricht einer Schichtdicke von etwa 20 m reiner inaktiver Kreide, falls man das Absorptionsgesetz der γ-Strahlen mit dem den Arbeiten Mc Clellands bzw. Eves entnommenen Werte für λ zugrunde legt.

Die im vorigen beschriebenen Versuche stellen die Existenz einer stark durchdringenden Strahlung außer Zweifel. Von großem Interesse ist die Feststellung ihrer Größe und Richtung. Bleiben wir zunächst bei dem letzten Punkte, so ist es wieder Cooke[28]), der auch hierin zuerst Beobachtungen angestellt hat. Seine Versuche mit Bleischirmen, die oberhalb, unterhalb und seitlich von dem Versuchsgefäß eingeschaltet wurden, ergaben eine im gleichen Maße verminderte Zerstreuung im Innern, ein sehr befremdliches Ergebnis, das besagen würde, daß die allgemeine Strahlung keine bestimmte Richtung im Raume hat. Diese Versuche Cookes können in zwei Beziehungen unzulänglich sein. Erstens beobachtete anscheinend Cooke im Zimmer eines Gebäudes. Da sicher alle Wände desselben Eigenstrahlen — in gleicher Weise wie die oben erwähnten Ziegelsteine — ausstrahlen, so ist, falls die Eigenstrahlung die Intensität der absorbierten durchdringenden Strahlung übertrifft, auch von allen Seiten eine gleiche Intensität der Strahlen zu erwarten. Zweitens sind die Schirme vielleicht nicht genügend dimensioniert gewesen, um bei den geringen Wirkungen einen Unterschied der Richtung klar und deutlich erkennen zu lassen.

Mc Lennan[43]) wiederholte in anderer Weise diese Versuche, indem er von folgenden Gesichtspunkten ausging. Als Hauptquelle der durchdringenden Strahlung ist die Erde anzunehmen, dann müssen von ihr aus die Strahlen in die Atmosphäre eindringen. Läßt sich nun auf der Oberfläche der

Erde ein natürlicher, großer, genügend dicker, frei von radioaktiven Substanzen erkannter Schirm finden, so muß, falls man sich auf ihm mit einem Meßinstrument befindet, die Ionisation der Luft im Zerstreuungsraume abnehmen. Ebenso hatten schon vorher Elster und Geitel die Ansicht ausgesprochen, daß man über dem Meere nur einen sehr kleinen von der Erdstrahlung herrührenden Teil der normalen Ionisierung der Luft erwarten müßte. — Mc Lennan stellte seine Beobachtungen auf dem Ontariosee an, dessen Wasser er als kaum radioaktiv und nahezu frei von Emanationen gefunden hatte; und in der Tat, er erhielt das, was er erwartet hatte, ein deutlich erkennbares Zurückgehen der Ionisation an seinem Zerstreuungsmesser. Diese Versuche McLennans und außerdem die seines Schülers Wright[44]) zeigen uns klar und deutlich die Richtung, aus der die durchdringenden Strahlen kommen. — Auch Wright konstatierte immer einen ganz bedeutenden Rückgang der Ionisation, sobald er auf dem See seine Messungen anstellte. Die Versuche Wrights sind insofern noch interessant, als sie sofort den Einfluß erkennen lassen, den gewöhnliche Materialien, die aber Spuren von anhängender Aktivität zeigen können, auf die Ionisation der Wrightschen Zerstreuungsräume (gleichdimensionierte Zink-, Blei- und Aluminiumzylinder von 60 cm Höhe und 24 cm Durchmesser) ausübten. Zunächst maß Wright an Bord eines Dampfers, der den Ontariosee durchkreuzte. Er erhielt eine Abnahme von 15 Proz. Sodann wurde längs des sandigen Gestades der Torontobai gemessen. Hier wurde die stärkste Abnahme in einem hölzernen Bootshause erzielt, das auf Pfahlrosten errichtet war, die in 6 m tiefem Wasser standen, nämlich 45 Proz. — Den ganz enormen Wert von 60 Proz. erreichte der Rückgang der Ionisation, als der Zerstreuungsmesser auf dem 30 cm dicken Eise in der Nähe des erwähnten Hauses aufgestellt wurde. — Wir sehen eine vorzügliche Bestätigung der Voraussicht Elsters und Geitels[46]), daß über Wasser eine bedeutende Schwächung des Effekts eintreten müsse. — Aus dem Unterschiede der Abnahme der Ionisation auf dem Dampfer (15 Proz.) und auf dem freien Wasser (60 Proz.) geht hervor, daß 45 Proz. noch den radioaktiven Verunreinigungen zuzuschreiben sind, die der Dampfer mit sich führte.

Wir gehen nun zu den Versuchen über, die sich mit der Berechnung der Intensität dieser Strahlen befassen. Um die Intensität gleichartiger γ-Strahlen miteinander vergleichen zu können, berechnet man am einfachsten die Anzahl der positiven und negativen Ionen, die in einer Sekunde in einem Kubik-

zentimeter Luft gewöhnlicher Dichte von ihnen gebildet werden, und vergleicht diese miteinander. Bezeichnet E_0 bzw. E_1 die Elektrizitätsmengen auf dem Zerstreuungskörper zu Anfang und am Ende einer Messung, V_0 und V_1 die entsprechenden Potentiale in Volt, C die Kapazität des ganzen Systems und J den Inhalt der Ionisationskammer, ist ferner $3{,}4 \,.\, 10^{-10}$ *) die bekannte Ladung des Ions, so ist die Berechnung der Anzahl der durch die Strahlen erzeugten Ionen folgende:

$$E_0 - E_1 = C(V_0 - V_1),$$

$$q = \frac{C(V_0 - V_1)}{300 \,.\, J \,.\, 60 \,.\, 60 \,.\, 3{,}4 \,.\, 10^{-10}}.$$

Da nun aber, wie wir im ersten Teile erkannt haben, zugleich einige Ionen noch durch andere Einflüsse, hauptsächlich durch radioaktive Verunreinigungen im Innern des Zerstreuungsraumes gebildet werden, so muß man ihren Anteil von dem erhaltenen Resultat in Abzug bringen. Man bestimmt diesen Betrag, indem man das Versuchsgefäß durch einen genügend dicken Schirm vor der durchdringenden Strahlung schützt. Um den noch zurückgebliebenen Rest der Ionisierung ist das ursprüngliche Resultat zu verringern. Eine Korrektion, die infolge der Absorption der durchdringenden Strahlen durch die Metallwände des Zerstreuungsraumes anzubringen wäre, ist so gering, daß man sie außer acht lassen kann. — W. L. Cooke[28]) fand so, indem er sein Gefäß mit einem 5 cm dicken Bleischirm umgab, 4,5 Ionen im Kubikzentimeter in der Sekunde. Dieser Wert ist vielleicht zu groß, denn es ist anzunehmen, daß der Schirm nicht die gesamte durchdringende Strahlung abgehalten hat. Sodann muß man bedenken, daß alles Blei immer Ra D in kleinen Mengen enthält. Dies verwandelt sich in E_1, E_2 und F. Ra F gibt nur α-Strahlen aus, die in unserem Falle, da sie die Wände des Ionisationsgefäßes nicht zu durchdringen vermögen, nicht wirken können. Dagegen hat E_2 eine schwache β-Strahlung, also sind auch Spuren von γ-Strahlen vorhanden, auf deren Rechnung ein geringerer oder größerer Bruchteil der 4,5 Ionen, je nach dem Bleimaterial des Mantels, zu setzen ist. — Mc Lennan[47]) gelangte auf etwas anderem Wege zu der Annahme, daß 9 Ionen im Kubikzentimeter in der Sekunde gebildet würden. Er ging von der Beobachtung aus, daß eine seiner bleiernen, gleich dimensionierten Ionisationskammern einen ganz besonders geringen Wert für die im Kubikzentimeter und in einer Sekunde erzeugte

*) Der alte Wert $3{,}4 \,.\, 10^{-6}$ ist absichtlich gewählt.

Ionenzahl ergab. Er schloß daraus, daß die Wände dieses Raumes nur wenig, wenn nicht sogar überhaupt nicht durch radioaktive Substanzen verunreinigt seien. Nachdem er dann durch Messungen an sehr steifen γ-Strahlen des Radiums konstatiert hatte, daß in einem Bleigefäß nur $^1/_3$ der Ionen durch die direkte γ-Strahlung, $^2/_3$ aber durch die an den Gefäßwänden erregte Sekundärstrahlung erzeugt wurden, und ferner die Absorption der γ-Strahlung durch die Zylinderwandungen bestimmt hatte, wandte er diese Erfahrungen auf die durchdringende Strahlung an. — In dem erwähnten Bleizylinder wurden 23 Ionen im Kubikzentimeter und einer Sekunde gebildet. $^1/_3$ derselben, also etwa 8, kämen davon auf die Primärstrahlung. Da die Absorption der Bleiwandungen 15,36 Proz. derselben betrug, so wären es hiernach etwa 9 Ionen, die im Kubikzentimeter in einer Sekunde in freier Luft gebildet würden. — Wie wir bemerkten, ging McLennan von der Voraussetzung aus, daß das Blei seines Versuchsgefäßes vollständig frei von Verunreinigungen durch Produkte des Radiums sei. McLennan bemerkt ausdrücklich, daß es sich hier nur um eine Annahme handelt, die von ihm erhaltene Zahl ist nur als Grenze anzusehen, über die hinaus die Intensität der durchdringenden Strahlung sicher nicht geht. Daß seine Annahme aber unberechtigt ist, ersieht man aus der früher erwähnten Tatsache, daß Blei immer Ra D mit sich führt, und hier kommt nicht allein die γ-Strahlung von Ra E, sondern vor allen Dingen die α-Strahlung von Ra F ganz erheblich in Betracht. — Wright[44]) wandte wieder die Schirmmethode an, indem er auf dem Ontariosee seine Beobachtungen mit Blei-, Zink- und Aluminiumgefäßen anstellte. Die Differenzen der auf dem Lande und dem See beobachteten Zahlen der Ionen waren 4,6, 5,1 und 3,9, je nach dem Material der Wandungen. — Im Mittel decken sich diese Zahlen gut mit der von Cooke erhaltenen Zahl von 4,5 Ionen. Auch Wrights Werte sind vielleicht etwas zu hoch, denn ein vollkommener Schirm ist ja der Ontariosee auch nicht. Das Gefäß wird ferner doch immer von Luft umspült, die außer ihrem Emanationsgehalt die Induktionen der radioaktiven Substanzen enthält, die, wie wir noch erkennen werden, die Ionisation des Gefäßes, wenn auch nur in geringer Weise, beeinflussen. Daß der See auch ganz frei von Emanation ist, dürfte ebenfalls nicht erwiesen sein, da eigentlich in jedem Wasser, falls man nur genügend Quantitäten davon untersucht hat, Emanation gefunden worden ist. — Allerdings ist nicht zu verkennen, daß gerade eine bewegte Wasseroberfläche

insofern günstig wirkt, als auf ihr keine Induktionen sich ablagern können.

Nehmen wir aber trotzdem einmal an, daß der Wert 4,5 Ionen der wahrscheinlich genaueste ist, und wenden das erwähnte Gesetz von Mc Lennan des Verhältnisses der Primär- und Sekundärstrahlung für ein Bleigefäß an, so würden etwa 2 Ionen im Kubikzentimeter in der Sekunde in freier Luft durch die durchdringende Primärstrahlung erzeugt werden.

Im gewissen Gegensatz zu den bisher besprochenen Arbeiten steht eine Veröffentlichung Strongs[48]). Um ihren Inhalt zu verstehen, müssen wir auf eine Untersuchung von Eve[49]) zurückgehen, in der mit Hilfe von Messungen der durchdringenden Strahlung der Gehalt der Erdoberfläche an Radium für die Volumeneinheit berechnet wird.

Eve[49]) nimmt an, daß die 4,5 Ionen im geschirmten Cookeschen Ionisationsmesser lediglich der durchdringenden Strahlung zuzuschreiben sind. Sodann bestimmt er experimentell die Anzahl der Ionen, die durch die härtesten γ-Strahlen von einem Gramm Radiumbromid, reduziert auf die Entfernung von 1 cm, in demselben Gefäß erzeugt werden. Er erhält als Maximalwert $3{,}6 \cdot 10^9$ Ionen. Rechnen wir diesen Wert auf ein Gramm reines Radium um, so erhält man: $3{,}6 \cdot 1{,}7 \cdot 10^9 = 6{,}12 \cdot 10^9$ Ionen.

Das Verhältnis dieses und des Cookeschen Wertes ist: $1{,}4 \cdot 10^9$.

Denkt man sich nun die Ionisationskammer glatt auf den Erdboden gestellt, zieht in ihn hinein vom Apparat aus Gerade, so ist die von einem durch eine solche Linie getroffenen Volumenelement der Erdmasse bewirkte Strahlung durch seine Entfernung r vom Apparate, durch seinen Radiumgehalt und durch den Absorptionskoeffizienten $\lambda = 0{,}092$ der Erdsubstanz für die γ-Strahlen des Radiums bestimmt. Die Strahlung eines Volumenelementes dv ist dann unter Berücksichtigung der Abnahme der Intensität mit dem Quadrat der Entfernung:

$$ds = \frac{k \cdot \varrho}{r^2} \cdot e^{-\lambda r} \cdot dv,$$

wo ϱ den Grammgehalt an Radium in der Volumeinheit der Erdmasse und k die oben berechnete Zahl $6{,}12 \cdot 10^9$ bedeuten. — Eine halbkugelförmige Schale von der Dicke dr, in deren Mittelpunkt unser Ionisationsraum sich befindet, erhält die Strahlung

$$ds = \frac{k \cdot \varrho}{r^2} \cdot e^{-\lambda r} \cdot 2\pi r^2 \cdot dr.$$

Die Gesamtstrahlung, die unser Apparat also von der Erde erhält, ist:

$$s = \int_0^\infty \frac{k \,.\, \varrho}{r^2} \cdot e^{-\lambda r} \cdot 2\pi r^2 \cdot dr$$

$$s = \frac{2\pi k \,.\, \varrho}{\lambda}.$$

Die Größe δ setzt nun Eve als 4,5 Ionen ein und bestimmt somit:

$\varrho = 1{,}1 \,.\, 10^{-11}$ g Ra im Kubikzentimeter der Erde,

d. h. $0{,}4 \,.\, 10^{-11}$ g im Gramm Gestein.

Trotz des unsicheren Wertes von 4,5 Ionen als Maß der Strahlungsintensität der Erde stimmt das Resultat Eves sehr gut mit dem für Eruptivgestein gefundenen Maximalwert Strutts $= 4 \,.\, 10^{-12}$ g im Gramm Gestein überein. — Strong verfährt nun umgekehrt. Er nimmt die Radiummenge ϱ als bekannt an und berechnet daraus die Ionenzahl pro Kubikzentimeter und Sekunde, die durch eine dem ϱ entsprechende Radiummasse in freier Luft erzeugt wird. Da er den Radiumgehalt wie Strutt auf das Gramm Gestein bezieht, so geht in die Formel noch die Konstante $\delta = 2{,}7$, die Dichte des Gesteins, ein; sie erhält die Form:

$$s = \frac{2\pi k \,.\, \delta \,.\, \varrho}{\lambda}.$$

Da nun Strong $\varrho = 0{,}9 \,.\, 10^{-12}$ g pro Gramm Gestein setzt, so erhält er:

$$s = 0{,}9 \text{ Ionen.}$$

Aus dem Vergleich dieser Werte mit dem von Cooke (4,5) und dem von McLennan (9) zieht er den Schluß, daß der Radiumgehalt des Erdbodens viel zu klein sei, „um für die gesamte durch die äußeren durchdringungskräftigen Strahlen erzeugte Ionisation aufkommen zu können“. — Hiergegen läßt sich nun folgendes einwenden:

Erstens läßt sich das Resultat Strongs: 0,9 Ionen mit McLennans Werte 9 Ionen nicht vergleichen, denn McLennan macht ausdrücklich darauf aufmerksam, daß er nur einmal annehmen wolle, der Bleizylinder sei frei von radioaktiven Verunreinigungen. (In der Tat ist aber RaF, wie wir oben gesehen haben, die Substanz, die hier gerade den verhältnismäßig großen Betrag von Ionen liefert.) Mit Cookes Werte 4,5 Ionen ist aber das Resultat Strongs erst recht nicht zu vergleichen. Denn 4,5 Ionen werden im Cookeschen Zer-

streuungsraum durch die Gesamtstrahlung gebildet, d. h. sowohl durch die primären wie auch sekundären Strahlen an der Gefäßwand, die eine Folge der ersteren sind. Nach den schon öfter erwähnten Erfahrungen Mc Lennans wird aber nur der dritte Teil der Ionenzahl von den Primärstrahlen in Bleigefäßen erzeugt. Strong könnte also seinem Wert 0,9 nur 1,5 oder höchstens 2,2*) Ionen gegenüberstellen, falls man berücksichtigt, daß Cooke in einem Messinggefäß beobachtet und die Absorptionskorrektion, wie oben erwähnt, vernachlässigt.

Zweitens ist die Größe ϱ aus verschiedenen Gründen zu klein angesetzt:

a) Der mittlere Radiumgehalt der Gesteine ist nach den neuesten Untersuchungen, besonders denen von Joly, zu gering genommen. Betrachten wir die auf Seite 209 gegebenen Werte, so erkennen wir, daß man als guten Durchschnittswert $4 . 10^{-12}$ g pro Gramm Gestein ansehen darf.

b) Sodann haben wir noch gar nicht an das Thorium, ganz abgesehen von dem weniger verbreiteten Aktinium, gedacht. Nach vielen Forschungen ist dies aber durchaus nicht zu übersehen. So findet Blanc in Italien, hauptsächlich in der Nähe von Rom, den Durchschnittswert von $4 . 10^{-5}$ g pro Gramm Gestein. Joly bestätigt dies — und dies deutet auf eine allgemeine Verbreitung — für viele alpine Gesteine. Er erhält dieselbe Größenordnung $1 . 10^{-5}$ g pro Gramm Gestein.

c) Ferner ist zu erwägen, daß gerade in den obersten Erdschichten und auf dem Erdboden die radioaktiven Substanzen sehr angereichert sind, und zwar Radium sowohl wie Thorium.

d) Schließlich werden auch durch die Atmosphärilien eine Menge von Induktionen aus der Atmosphäre im Laufe der Zeit zur Erde geführt. Groß ist auch die Zahl der Partikelchen der radioaktiven Substanzen, die den Kraftlinien des elektrischen Feldes der Erde folgend auf ihrer Oberfläche sich ablagern. Da diese je nach ihrer Lebensdauer mehr oder weniger schnell abklingen, geben sie neben dem konstanten Teil der Strahlung von der Erde aus einen mannigfach variablen Teil.

Kehren wir zum Schluß nochmals zu dem Werte 1,5 bzw. 2,2 Ionen zurück, der mit Hilfe der Erfahrungen McLennans aus der Cookeschen Zahl 4,5 berechnet ist, und fragen wir uns, wie groß muß der Radiumgehalt in Gramm im Gramm Gestein sein, um diese Ionenzahl pro Kubikzentimeter zu erzeugen, so ergibt die oben erwähnte Formel:

---

*) Vgl. weiter unten Seite 234.

$$\left.\begin{array}{l} \varrho = 3{,}6 \,.\, 10^{-12}\,\text{g im Gramm Gestein} \\ \text{bzw.} = 5{,}2 \,.\, 10^{-12}\,\text{g im Gramm Gestein} \end{array}\right\} \begin{array}{l}\text{im Mittel also} \\ 4{,}4 \,.\, 10^{-12}\,\text{g}\end{array}$$

Wir sehen, daß dieser Wert in guter Übereinstimmung mit dem mittleren Radiumgehalt der Gesteine ist, ganz abgesehen von den anderen radioaktiven Substanzen und den auf dem Erdboden abgelagerten Induktionen. Wenn wir hier sagen, daß etwa 2 Ionen von der durchdringenden Strahlung im Kubikzentimeter in der Sekunde erzeugt werden, so soll diese Feststellung nur eine erste Annäherung sein, zumal da lokale Einflüsse sicher mitwirken. Man erkennt, daß nur ein Bruchteil der Ionisation der freien Atmosphäre der durchdringenden Strahlung gegenüber den andern die Luft ionisierenden Faktoren, vornehmlich den Emanationen und der Bodenluft zuzuschreiben ist. Das Verhältnis derselben ist etwa $^1/_{12}$*). Ferner ist die angenommene Zahl von 2 Ionen immer nur ein Durchschnittswert, denn wie man aus den Versuchen Wrights sieht, können lokale Einflüsse eine bedeutende Änderung dieser Größe herbeiführen. — So ist anzunehmen, daß in Gegenden, wo stark radioaktive Gesteine vorhanden sind, die Ionisation im Zerstreuungsraum eines geschlossenen Gefäßes größer gefunden werden wird. Sodann wird diese ja auch durch die Induktionen der Atmosphäre beeinflußt.

Nicht nur lokalen, sondern auch zeitlichen Schwankungen ist die Ionisation unterworfen. Da nun an einem Orte der Erde die Strahlung von der Erde annähernd konstant ist, so müssen die Schwankungen der Ionisation auf den variablen Teil der Strahlung, der von den Umwandlungsprodukten in der Atmosphäre ausgeht, zurückgeführt werden. Hierauf baut sich eine Methode McLennans[50]) auf, die Größe der Induktionen in der Atmosphäre mit Hilfe einer Ionisierungskammer zu bestimmen. Denkt man sich eine solche in der Eveschen schon erwähnten Weise durch die Strahlen von Radium geeicht, so vermag man, da die Schwankungen der Ionisation proportional der Ab- und Zunahme der Induktionen in der Luft bzw. der näheren Umgebung des Gefäßes sein müssen, aus diesen zu erkennen, ob sich geringe oder größere Mengen von Induktionen in der Luft befinden. Ändert man den Aufstellungsort des Apparates, so könnte man ihn dazu verwenden, Gesteinsschichten aufzusuchen, die sich durch reicheren Gehalt an radioaktiven Substanzen vor den anderen auszeichnen.

---

*) Nach Rutherford sollen nämlich etwa 24 bis 30 Ionen im Kubikzentimeter/Sekunde in der Atmosphäre entstehen.

e) Die Periode der Strahlung. Als Campbell und Wood[51]) Versuche über die spontane Ionisation der Luft in geschlossenen Gefäßen anstellten, kamen sie unter anderen zu dem sehr merkwürdigen Ergebnis, daß diese eine ausgesprochene tägliche Periode zeigte. Das graphische Bild derselben lieferte innerhalb 24 Stunden zwei deutliche Maxima und zwei Minima. Die beiden ersteren lagen zwischen 8^a und 10^a und 10^p und 1^a; die letzteren traten sehr regelmäßig um 2^p und 4^a auf. Diese tägliche Periode der Ionisation in geschlossenen Gefäßen ist von vielen Forschern bestätigt worden, von andern wieder nicht. Zu den ersteren gehören neben Wood und Campbell[51]) Strong[53]), Borgmann[52]), Mache und Rimer[54]), Wulf[55]), während Gockel[40]), McLennan und Wright[44]) sie nicht fanden. — Zur Erklärung dieser Periode nimmt Richardson[52]) eine außerterrestrische Quelle an, die sehr steife durchdringende Strahlen aussenden soll. Variiert die Stärke derselben, so ändert sich die Ionisation der Atmosphäre besonders in den oberen Schichten. Bei einer Zunahme derselben werden die höchsten Luftschichten stark leitend. Es nähert sich deshalb die dem Erdboden gegenüberstehende positiv geladene Luftschicht der Erde. Dadurch steigt nun wieder das Potentialgefälle in der Nähe der Erde an. Da bei Zunahme der durchdringenden Strahlung auch eine solche der Ionisation im Zerstreuungsraume des Meßapparates eintritt, so muß also ein Maximum der durchdringungskräftigen Strahlung mit einem solchen des Potentialgefälles zusammenfallen. Es ist nun aber, wie Gockel sagt, durchaus unwahrscheinlich, daß die durchdringende Strahlung vorzugsweise nur die oberen Luftschichten ionisieren soll, nicht aber die dichteren unteren, und gar diese erst dann, wenn sie durch Metallwände gegangen ist. — Sodann müßte sich eine Zunahme der Zerstreuung in geschlossenen Gefäßen mit der Höhe zeigen. Wir werden später sehen, daß gerade das Umgekehrte eintritt, nämlich eine sehr starke Abnahme mit der Höhe. Ferner ist eine Quelle der hypothetischen Strahlung nicht abzusehen*).

Eine andere, plausiblere Erklärung geben Mache und v. Schweidler[50]). Sie nehmen als Quelle der konstanten durchdringenden Strahlung die Erde an. Die Schwankung der Ionisation im Zerstreuungsraum des Meßapparates ist, wie wir schon gesehen haben, eine Folge des in der Luft und der Um-

---

*) Vgl. K. Kurz, Ber. d. D. Phys. Ges. **21**, 629 ff., 1909. (Diese Arbeit und die von Wulf, Phys. Zeitschr. **10**, 997, 1909, erschienen erst nach Einreichung des Manuskripts der vorliegenden Abhandlung.)

gebung desselben befindlichen, variierenden Gehalts an radioaktiven Induktionen. Es ist darum klar, daß zur Zeit des Maximums des Potentialgefälles auch die Strömung der Induktionen gegen die Erde ihren Höchstwert erreicht, und diese veranlassen dann in der Folge — ob sie nun auf den Apparat oder in dessen Nähe sich ablagern — den Höchstwert der Ionisation im Zerstreuungszylinder. Diese Erklärung unterstützen zahlreiche Beobachtungen verschiedener Forscher. Länger anhaltendes hohes positives Potentialgefälle verursacht immer eine Verstärkung der Ionisierung, bei niedrigem oder gar negativem dagegen tritt sofort eine Schwächung ein. Ferner ist der tägliche Gang des Potentialgefälles bekanntlich im Sommer ein anderer wie im Winter. Die stark ausgeprägte Mittagsdepression des Sommers verschwindet immer mehr, je näher der Winter heranrückt. Wulf ist es in seinen Versuchen gelungen, zu zeigen, daß mit fortschreitender Jahreszeit die Mittagsdepression auch in der durchdringenden Strahlung allmählich verschwand. Sodann zeigt sich während des Regens und Schneiens eine Abnahme, hernach aber eine Zunahme der Ionisation. Die Induktionen werden eben durch die Atmosphärilien auf der Erde abgelagert. Sie zerfallen, und nach einer bestimmten Zeit, die durch ihre Größe auf die Art der radioaktiven Induktion Schlüsse ziehen läßt, wird der normale Wert der Zerstreuung wieder erreicht. — Aus dem geringeren oder größeren Gehalt an Induktionen erklärt sich dann auch der Einfluß der Windrichtung und Stärke auf die Ionisierung der Luft in einem abgeschlossenen Gefäße.

Schließen wir uns dieser gut begründeten Erklärung Maches und v. Schweidlers an, so lassen sich einige Resultate von Wood und Campbell schwer erklären. Wood und Campbell arbeiteten in einem Zimmer. Hier kann man unmöglich die Schwankungen der Ionisation der Luft im Meßapparat dem variierenden Potentialgefälle zuschreiben. Dies könnte nur dann der Fall sein, wenn der Meßraum unbedeckt oder direkt unter einem dem Erdfelde gut exponierten Dache gelegen gewesen wäre. Wulf bekam in einem Versuchsgefäß, das dicht an einem offenen Fenster stand, nur sehr geringe periodische Schwankungen. Auch mir ist es nie gelungen, im geschlossenen Zimmer regelmäßige Veränderungen zu erkennen. Dasselbe bestätigen die Versuche Wrights, der gleichfalls im Zimmer eine Periode der Ionisation nicht findet. Sodann betonen beide Autoren, daß die Wetterlage ohne irgend welchen Einfluß auf die zu messende Ionisation gewesen sei. Da feststeht, daß bei wechselndem Wetter auch an eine

reguläre Veränderung des Potentialgefälles nicht zu denken ist, so ist auch eine Periode in der Ionisierung schwer verständlich. Wulf hat bei schlechtem Wetter auch von einer Periode der Strahlung nie etwas gemerkt. Ferner vergleichen Wood und Campbell ihre erhaltenen Ionisationskurven mit den Potentialkurven, die ihnen vom Observatorium in Kew zur Verfügung gestellt sind. Das ist aber eine gewagte Sache, denn nach Exners Beobachtungen trägt gerade die tägliche Periode des Potentialgefälles einen ganz ausgesprochenen lokalen Charakter. Orte, die weiter als 100 m auseinander liegen, zeigen, wie Elster und Geitel nachgewiesen haben, in den Schwankungen des Potentialgefälles kaum eine zeitliche Übereinstimmung. Kew liegt aber über 80 km von Cambridge, dem Beobachtungsorte Woods, entfernt. Daß beide Forscher trotzdem die Übereinstimmung beider Kurven finden, zumal die Werte der Potentiale aus einem Jahr vorher stammen, ist auffallend und wohl nur dadurch möglich geworden, daß für beide Kurven Durchschnittswerte genommen wurden.

Daß eine tägliche Periode der durchdringenden Strahlung im Freien existiert, die sich verhältnismäßig gut der Periode des Potentials anschließt, ist hauptsächlich nach den neuesten Versuchen Wulfs ohne Frage. Will man die Größe der Amplitude der täglichen Schwankung der durchdringenden Strahlung aus den von den Beobachtern gegebenen Ionisationskurven feststellen, so stößt man auf eine nicht zu überwindende Schwierigkeit. Die Form der Kurven wird nämlich durch zwei Unbekannte bedingt. Die eine ist die Strahlung, die von dem Erdboden ausgeht, die andere die, die von den Induktionen erzeugt wird. Ist die erstere stark, so ist die Schwankung prozentualiter gering und umgekehrt. Es muß daher genügen, die Werte der einzelnen Autoren aufzuzählen. — Wood und Campbell geben die Schwankung der Ionisation im Verlaufe eines Tages zu 12 Proz. an. Es liegen die Kurven von Februar, März, April, Juni und August vor. Am stärksten ist die Abenddepression im April. Eigentlich sollte man erwarten, daß die vormittägige Schwankung im Februar am deutlichsten ausgeprägt wäre, da zu dieser Tageszeit in jenem Monat das Potential im Durchschnitt seinen tiefsten Wert erreicht. Überhaupt fällt an den Kurven auf, daß die prozentualen Schwankungen der Ionisation und des Potentials durchaus nicht immer korrespondieren. Das liegt vermutlich an dem schwankenden Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen infolge verschiedener meteorologischer Verhältnisse.

Mache und Rimmer beobachteten im Juni. Sie fanden für die Depression am Morgen 3,7 Proz. und für die am Abend 5 Proz.; zwei Werte, die sich wohl aus der Potentialkurve des Juni erwarten lassen, da der Abendwert des Potentialgefälles der kleinere ist.

Aus Strongs Kurven, die nur ein Maximum zeigen, berechnet man die Schwankung zu etwa 10 Proz. — Wulfs Resultate sind im Oktober und November gewonnen; sie sind in guter Übereinstimmung mit den Potentialwerten. Im Oktober war die vormittägige Schwankung die größere, 16 Proz. des maximalen Betrages, gegenüber 10 Proz. für die Nachmittagsdepression. Im November verschwand die Schwankung am Mittag fast gänzlich, dafür stieg aber die Morgenamplitude um 5 Proz., also auf 21 Proz.

Schreibt man die Schwankung der Ionisation im Zerstreuungsraum den variierenden Beträgen der Luft an radioaktiven Substanzen zu und nimmt an, daß ein weiterer Betrag an Induktionen am Erdboden außerdem vorhanden ist, der, wie uns Messungen zeigen, nicht allzu groß eingeschätzt werden darf, so wird man ohne weiteres schließen können, daß der Einfluß dieser Massen in der Luft und auf dem Erdboden im Verhältnis zu dem von dem Gehalt der Erdkruste an radioaktiven Substanzen ausgeübten nur überaus gering sein kann.

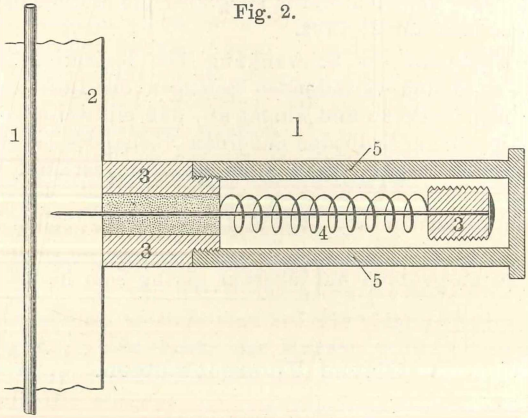
2. Eigene Untersuchungen.

A. Der Apparat.

Seit einem Jahre bin ich damit beschäftigt, die durchdringende Strahlung der Erde mit zu untersuchen. Einige Versuche liegen schon Jahre zurück. — Zunächst arbeitete ich mit dem erwähnten Ionisationsgefäß, welches aus einer Glaskugel von $2^1/_2$ l Inhalt bestand, die inwendig versilbert war. Sie war einfach auf ein Wulfsches Elektroskop gesetzt. Der Zerstreuungskörper war ein 22 cm langer Messingstab. Dieser Apparat bewährte sich nicht. Die Ionisierung war zu hoch und zeigte sich kaum von der Schirmung gegen die äußere Strahlung abhängig. Da ich eine Verunreinigung des Glases durch Spuren von radioaktiver Substanz vermutete, ließ ich bei der Firma Günther & Tegetmeyer hier mir einen Apparat bauen, der im großen und ganzen sich der Konstruktion desjenigen anschließt, den Elster und Geitel bei ihren Versuchen im Hedwigsburger Steinsalzbergwerk benutzt haben.

In den verlängerten Hals eines Wulfschen Elektrometers ist luftdicht, durch Picein abgedichtet, ein Bernsteinstopfen eingeschraubt. Dieser trägt nach oben ein 50 cm langes Aluminiumrohr, das nach unten in leitender, von der Luft abgeschlossener Verbindung mit den metallisierten Quarzfäden des Elektroskops steht. Über diesem Zerstreuungskörper befindet sich ein Zinkzylinder von 0,5 mm Wandstärke und 1 mm Boden- und Deckelstärke. Seine Höhe ist 60 cm und der Durchmesser 50 cm. Oben und unten trägt er je einen luftdicht schließenden Hahn, die mit Paraffin zugegossen waren. Die Ladesonde (s. Fig. 2) befindet sich ebenfalls im Halse des Wulfschen Elektrometers. Letzteres konnte bis zu einem Potential von 300 Volt

Fig. 2.

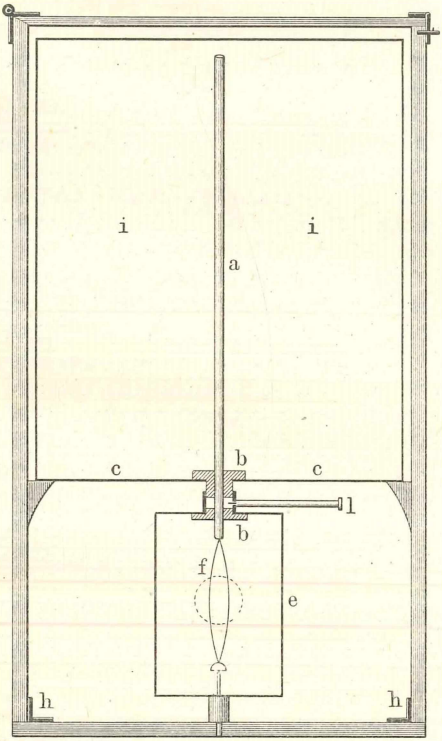


1. Aluminiumrohr. 2. Hals des Elektrometers. 3. Bernstein. 4. Feder. 5. Hülse, abschraubbar.

aufgeladen werden. Da der Apparat häufig transportiert werden sollte, war er in ein festes System sich oben und unten kreuzender Leisten eingeschlossen, die einerseits den Zinkzylinder mit trugen, andererseits den ganzen Apparat gegen Stöße und Verschiebungen der einzelnen Teile schützten. Zur Isolationsprüfung konnte die Kammer in einfachster Weise vom Elektrometer abgehoben werden. Ein stark schematisches Bild des Apparates ist in Fig. 3 gegeben. — Vor allen Dingen war dafür Sorge getragen, daß der Zylinder wirklich hermetisch geschlossen war. Verschiedene Druckproben bestätigten dies. Auch die Isolation hat niemals versagt. Der Verlust im Elektroskop betrug per Halbstunde 1,75 Volt, da dieser noch mit dem Verhältnis $\frac{4}{12.5}$ der beiden Kapazitäten, der des Elektrometers und der

des Gesamtapparates, zu multiplizieren ist, reduzierte sich das Korrektionsglied auf 0,56 Volt für die halbe Stunde. — Der Zylinder wurde, bevor er auf das Elektrometer gesetzt wurde, inwendig mit destilliertem Wasser ausgespült und tagelang trockene und filtrierte Luft durch ihn hindurchgepreßt. Schließ-

Fig. 3.



a) Aluminiumrohr. b) Bernstein. c) Grundplatte der Kammer. e) Wulfs Elektrometer. f) Fäden. h) Holzrahmen. i) Ionisationskammer. l) Ladevorrichtung (oben vergrößert gezeichnet).

lich wurde Luft hineingesogen, die durch Schwefelsäure getrocknet, zur Kondensation der vorhandenen Emanation durch flüssige Luft gekühlt und dann noch durch Watte filtriert war. Als dann der Sättigungsstrom gemessen wurde, zeigte sich sofort im Durchschnitt derselbe Wert der Zerstreuung wie heute noch, vorausgesetzt, daß der Apparat denselben Platz

im Zimmer behielt. Sobald aber der Ort geändert wurde, änderten sich auch die Ionisationen in demselben. Daß mit Sättigungsstrom gearbeitet wurde, ging daraus hervor, daß oberhalb einer Potentialgrenze von 230 Volt eine Zunahme des Potentialabfalls in der Zeiteinheit nicht mehr erreicht wurde. Der Vorsicht wegen wurde aber immer nur zwischen den Grenzen 240 und 280 Volt beobachtet.

B. Die Untersuchung der Strahlung.

1. Abhängigkeit vom Potential.

Zunächst suchte ich die Abhängigkeit der Ionisierung im Zinkzylinder vom Potentialgefälle der Elektrizität der freien Atmosphäre nachzuweisen. Die Resultate waren nicht deutlich genug, um einen Zusammenhang mit dem Potentialgefälle erkennen zu lassen.

Einmal sind die Potentialschwankungen im Verlaufe des Sommers, der mir für meine Beobachtungen zur Verfügung stand, bei gutem Wetter wenigstens, zu gering, um einen großen Unterschied in der Ionisation herbeizuführen; sodann liegen die Beobachtungstermine auch nicht weit genug auseinander, so daß die Potentiale stark voneinander verschieden sein könnten. — Sicher ist, daß der Durchschnittswert der Zerstreuung immer um etwas zunimmt, je näher wir dem Winter mit seinem höheren Potentialgefälle kommen. Genaue Daten vermag ich nicht zu geben; es sind aber weitere Beobachtungen der Ionisation mit simultanen Potentialmessungen geplant.

2. Abhängigkeit von den radioaktiven Induktionen.

Auch eine Einwirkung der radioaktiven Induktionen auf die Zerstreuung ist ohne Frage vorhanden. Es zeigte sich immer, daß, wenn der Zinkzylinder einige Zeit gestanden hatte, und er dann mit Schmirgelpapier und Bürste geputzt worden war, der Wert der Ionisation um einen kleinen Betrag sank. Dieser war verschieden, je nach dem Orte, an welchem man den Apparat die Zeit hindurch gebraucht hatte. Fast gleichgültig war es, ob er im Zimmer oder draußen im Freien gestanden hatte; hier ließ sich kaum ein Unterschied feststellen. War aber im Keller länger gemessen worden, so ließ sich der aktive Betrag sicher nachweisen; meist stieg der Unterschied auf $^1/_2$ Volt gegenüber dem früheren Ionisationswerte. Außerordentlich deutlich aber trat die Einwirkung der Induktionen hervor, als im Keller eine andere Ionisationskammer

isoliert aufgestellt und auf ein hohes negatives Potential (2400 Volt) länger aufgeladen war. Es stieg in diesem Falle der Spannungsverlust von 8,1 Volt auf 9,8 Volt per Halbstunde nach zweistündiger Exposition. — Dieser Versuch ist in gleicher Weise schon von Elster und Geitel nach Entdeckung des Gehaltes der Luft an Radiumemanation angestellt worden.

3. Abhängigkeit von den Atmosphärilien.

Daß auch die Atmosphärilien die Größe der Ionisation beeinflussen, läßt sich ebenfalls nachweisen. So sank an einem Tage (9. April) während eines kräftigen mehrere Stunden anhaltenden Regens der Wert der Ionisation um 1,6 Volt, um dann nach Aufhören desselben wieder langsam anzusteigen. Dasselbe zeigte sich auch bei Schneefall. Einen sehr tiefen Zerstreuungswert beobachtete ich im Winter vorigen Jahres gelegentlich anderer Messungen*) im Normalapparat von Elster und Geitel, als der Erdboden, mit einer hohen Schneedecke bedeckt, länger vollständig gefroren war. Mit dem Schwinden des Frostes und dem Auftauen des Schnees trat auch der alte Wert der Ionisation wieder auf. Verschiedenheiten der Zerstreuung bei Winden verschiedener Richtung festzustellen, ist mir nicht gelungen.

4. Abhängigkeit von dem Orte.

Wie stark der Ort die Ionisation beeinflußt, geht z. B. aus folgendem hervor: In der freien Atmosphäre am Erdboden betrug der Wert derselben 18 Volt, in meinem geschlossenen, dickwandigen Studierzimmer 20 Volt, im Keller 21 Volt und schließlich in einem Lichtschachte, der in die 6 m dicke Wandung des Andreaskirchturmes zu Braunschweig eingelassen war, gar 23,4 Volt.

5. Schirmwirkungen.

Auch Schirmwirkungen verschiedener Materialien wurden untersucht. Der Apparat wurde in einen Eisenkessel gesteckt und in Wasser gesenkt. Die Stärke des Eisens betrug 2 mm, die des Wassers 10,4 cm im Durchschnitt. Ich erhielt eine Abnahme von 14 Proz., ein Betrag, der in guter Übereinstimmung mit dem Burtons ist. Sodann wurde in einem sogenannten Safe eines Bankhauses gemessen. Während die

*) K. Bergwitz, Jahrbuch d. Rad. u. El. VI. 1, 11, 1909.

Ionisation der Luft im Zinkzylinder einen Spannungsverlust von 12,6 Volt (pro Halbstunde) in demselben ergab, betrug dieselbe in einem anderen ungeschirmten Raume des Hauses 22,3 Volt. — Eine Abnahme von 50 Proz. erhielt ich in folgender Weise. Der Ionisationsapparat wurde im Dachstuhl des Andreaskirchturmes zu Braunschweig aufgestellt. Derselbe besteht aus dicken Holzbalken, die, mit Schindeln überkleidet, eine etwa 2 mm dicke Kupferbedeckung tragen. Er hat die Form einer gewaltigen Glocke, die in ihrem höchsten Punkte einen zylinderförmigen Aufbau trägt, der in eine Spitze ausläuft. Hier in diesem Raume, in etwa 85 m Höhe von der Erde, wurde der Apparat aufgestellt. Es zeigte sich nun, daß, während die Zerstreuung am Fuße des Kirchturmes im Durchschnitt 18 Volt betrug, dieselbe oben gerade die Hälfte, (9 Volt im Durchschnitt) war. Der Versuch wurde nicht einmal angestellt, sondern oft und zu verschiedenen Zeiten wiederholt, immer ergab sich ein Unterschied von 50 Proz. — Zunächst wurde eine Schirmwirkung des Turmes vermutet, aber die folgenden Versuche ergaben ebenfalls außerhalb des Turmes dieselbe Abnahme. — Zufällig wird nämlich der Turm, da er infolge seines hohen Alters baufällig ist, mit einem eisernen, quadratischen Gerüst umgeben, dessen Höhe über 80 m beträgt, und dessen Eckpfeiler etwa 8 m vom Turme abstehen. Als hier gemessen wurde, ergab sich dasselbe Resultat wie im Dachstuhl des Turmes, der Verlust betrug pro Halbstunde ebenfalls fast 9 Volt.

6. Richtung der Strahlung.

Aus diesen Versuchen geht auch klar die Richtung und die Quelle der durchdringenden Strahlung hervor. Sie kann nur in der Hauptsache von der Erde ausgehen; die in der Luft enthaltenen Induktionen sind dabei von untergeordneter Bedeutung.

Die Beobachtungen auf dem Andreaskirchturm und dem ihn umgebenden Gerüste wurden bestätigt und ergänzt durch Messungen, die von mir im Freiballon*) in verschiedenen Höhen angestellt wurden. — Zu diesem Zwecke erfuhr der Meßapparat zunächst eine Umänderung. Für eine genaue Vergleichung der am Erdboden und in der Höhe erhaltenen Resultate ist es durchaus notwendig, die eingeschlossene Luftmenge auch

*) Dem Braunschweigischen Verein für Luftschiffahrt spreche ich an dieser Stelle meinen besten Dank für die Überlassung des Ballons „Braunschweig“ aus.

bei starker Druckabnahme außen unter demselben Druck zu erhalten. Damit nun die dünnen Wandungen des Zinkzylinders den starken Innendruck aushalten konnten, wurde er mit einem engmaschigen Netze von 1,6 mm dickem Draht umstrickt. Mit Hilfe eines längeren Strickes wurde er dann an den Gänsefüßchen des Ballonnetzes aufgehängt und durch Schnüre so gehalten, daß man ihn bequem vom Korbe aus ablesen konnte. Der Tag der Auffahrt war vom herrlichsten warmen Herbstwetter begünstigt, nicht eine Wolke erschien während der ganzen 9 stündigen Fahrt am Firmament. — Die Messungsresultate, von denen der Durchschnitt genommen ist, sind folgende:

	Höhe m	Verlust per $^1/_2$ Stunde Volt	Ionisierung in Prozenten der am Erdboden beobachteten
Gasanstalt Taubenstraße Braunschweig	0	16,0	100
Lüneburger Heide . . .	etwa 350	8,6	60
	„ 650	6,7	40
	„ 1300	3,8	25

Der letzte Wert schien bei weiterem Steigen ziemlich derselbe zu bleiben. Leider versagte der Apparat in diesem Augenblick. Während das Wulfsche Elektrometer in jeder Beziehung tadellos funktionierte, das heißt seine Fäden weder schwankten noch sonstige Mängel zeigten, war seine Verbindung mit den übrigen Teilen des Apparates ungünstig angebracht. Das straffgespannte Drahtnetz verhinderte zwar, daß der Zylinder sich in der Richtung seines Durchmessers ausdehnen konnte, aber längs der Achse wurden die Maschen allmählich zusammengezogen, und Boden nebst Deckel bauchten sich aus, wenn auch nur um ein geringes. Infolgedessen drückte der festgekeilte Zerstreuungskörper auf die obere Platte des fest in den Holzleisten befestigten Elektroskops, bog diese durch und machte so die Quarzfäden schlaffer. Dies wurde daran erkannt, daß plötzlich ohne irgend eine andere Veranlassung in 2000 m Höhe die Spannung im Elektroskop anscheinend bedeutend sank. — Es ist anzunehmen, daß auch von dem Augenblick an der Apparat trotz aller Vorsichtsmaßregeln undicht geworden ist. Beobachtungen beim Herunterkommen des Ballons sind infolgedessen als zwecklos nicht

ausgeführt worden. Daß bei den Messungen auf dem Andreaskirchturm bereits in 90 m Höhe eine Schwächung der durchdringenden Strahlung um 50 Proz. stattfand, im Ballon dagegen erst in 650 m Höhe, ist vielleicht darauf zurückzuführen, daß der Turm sich inmitten eines Häuserkomplexes befindet, der die γ-Strahlen der Erde stark abblendet, während sich unter dem Ballon die freie Atmosphäre befindet.

7. Größe der Strahlung.

Aus den Werten für die Ionenzahlen, die im Ballon erhalten wurden, wollen wir nun einen Schluß auf die Größe der durchdringenden Strahlung ziehen unter der Annahme, daß die 1300 m dicke Luftschicht die durchdringenden Strahlen vollständig absorbiert hat und die übriggebliebenen 3,8 Volt auf die Wirkung der Verunreinigung der Gefäßwände durch aktive Substanzen zu setzen sind. — Da der Zinkzylinder einen Inhalt von $25^2 . 60 . \pi$ ccm hat, die Kapazität des ganzen Apparates 12,5 cm beträgt und der Verlust am Boden 16 Volt per Halbstunde war, so erhält man, wie wir oben gezeigt haben, folgenden Ansatz:

$$\frac{(16-3{,}8) . 2 . 10^{10} . 12{,}5}{25^2 . 60 . \pi . 60 . 60 . 34 . 300} = 5{,}6 \text{ Ionen}$$

per ccm des Zinkgefäßes i. sec.

Um hieraus den Betrag der Ionisierung zu finden, den die durchdringende Strahlung in der freien Atmosphäre bewirkt, muß man, wie bereits erwähnt, den erhaltenen Ionenwert um die Zahl der Ionen vermindern, welche die Sekundärstrahlung der Wände des Ionisierungsgefäßes erzeugt. — Nach McLennans Angaben ist für Blei das Verhältnis der Primär- und Sekundärstrahlung:

$$\frac{J_s}{J_p} = \frac{2}{1}.$$

Nun soll nach Eve, wie McLennan zitiert*), die Sekundärstrahlung für Zink 53,7 Proz. von der an Blei erregten betragen. Es ist also das Verhältnis beider Strahlungen für Zink bei gleicher Primärstrahlung:

$$\frac{J_s}{J_p} = \frac{2}{1} \cdot 0{,}537 = 1{,}074.$$

*) Vgl. McLennan, On the Radioactivity of Lead and other Metals. Phil. Mag., Dec. 1907, p. 771.

Bei Zinkgefäßen ist also nach den Versuchen Eves die sekundäre der primären Strahlung etwa gleich. Daher finden wir, falls noch die geringe Absorption der durchdringenden Strahlung durch die Metallwände mit in Betracht gezogen wird, daß etwa drei Ionen im Kubikzentimeter in der freien Atmosphäre von den von der Erde ausgehenden durchdringenden Strahlen gebildet werden. — Die bekannte Relation

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}\,^{*)},$$

in der q die Zahl der im Kubikzentimeter Luft i. sec. durch die durchdringende Strahlung erzeugten Ionen (hier also drei) und α den Molisierungskoeffizienten (im Mittel etwa $3 \,.\, 10^{-6}$) bezeichnen, ergibt dann die Anzahl der Ionen (n), die im stationären Zustande im Kubikzentimeter der freien Atmosphäre vorhanden waren, falls nur die durchdringenden Strahlen der Erde ionisierend wirkten. Nach Einsetzen unserer Werte erhalten wir für n etwa 1000 Ionen je eines Vorzeichens. — Es ist interessant zu sehen, daß die Zahl etwa dieselbe ist, die durch den Ebertschen Aspirator gefunden wird.

8. Die Periode der Strahlung.

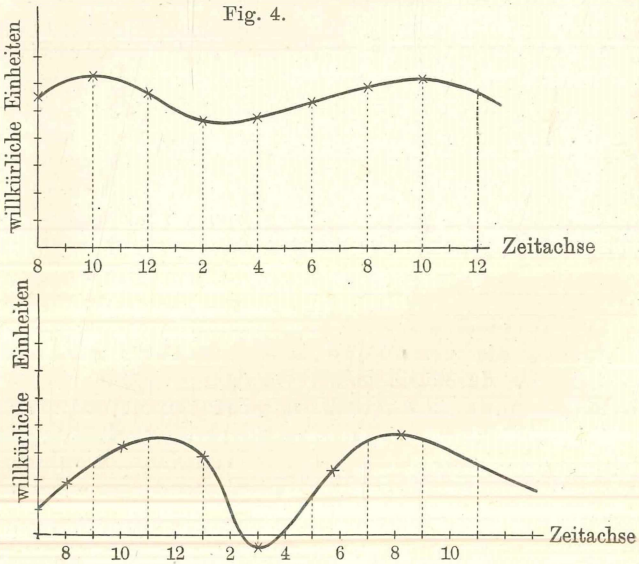
Auch die von Wood und Campbell aufgefundene Periode der durchdringenden Strahlung wurde untersucht. Zunächst stellte ich fest, daß von einer Periode nur bei gutem Wetter die Rede sein kann, schon die geringste Trübung in der Atmosphäre konnte dieselbe verderben; sodann, daß die Periode im geschlossenen Zimmer überhaupt nicht, im offenen nur schwach zu bemerken ist. An zwei verschiedenen Plätzen wurde die Periode mehrere Wochen hindurch bei heiterem Wetter beobachtet. Einmal auf freiem Felde, sodann auf der schon erwähnten Stelle unter dem Dache des Andreaskirchturmes. Zeichnen wir für beide Orte das graphische Bild des Verlaufes der Ionisation mit der Zeit für die Durchschnittswerte je dreier Tage (Fig. 4), so sehen wir zunächst, daß sie im großen und ganzen gleich verlaufen, d. h. die Ionisation steigt in den Morgenstunden, fällt mittags ab, um gegen Abend wieder in die Höhe zu gehen. Ein sehr starker Unterschied aber liegt in den Amplituden beider Kurven. Die Amplitude der Kurve, die aus den Werten der Ionisation unter dem Dache des Andreaskirchturmes erhalten wurde, ist größer und regelmäßiger als die der

*) Mache und v. Schweidler, At. Electr., p. 174, 1909.

auf freiem Felde gewonnen Kurve. Dies ist zu erwarten, denn das dem Erdfelde gut exponierte Dach, dem die Kraftlinien dicht gedrängt zustreben, ist als vorzügliche Sammelstelle der radioaktiven Induktionen anzusehen, die dann ihren Einfluß auf die Ionisationskammer ausüben. Sodann kommt noch hinzu, daß ja der konstante Teil der durchdringenden Strahlung von der Erdkruste aus in 80 m Höhe über dem Boden schon sehr stark geschwächt ist.

Die Kurven bieten uns auch die Möglichkeit, einen Schluß auf die Größe der Einwirkung der Induktionen auf die Ioni-

Fig. 4.



sation zu ziehen, wenn wir annehmen, daß sie allein die Schwankung der Ionisation in schon erwähnter Weise hervorrufen. — Während im ersten Falle die prozentuale Schwankung bezüglich des Maximalwertes etwa 10 Proz. beträgt, ist sie im zweiten Falle fast 20 Proz. An nicht exponiertem Orte ist also etwa nur $^1/_{10}$ der Ionisation auf die Einwirkung der variierenden Induktionen zurückzuführen; an stark exponierten Stellen dagegen steigt sie auf $^1/_5$ und vielleicht auch mehr an. Aus beiden Werten ergibt sich aber wieder, wie gering die Einwirkung der radioaktiven Induktionen, die in der freien Luft enthalten sind, auf die Zerstreuung im Ionisationsraum ist.

IV. Teil.

Die Resultate.

Fassen wir zum Schluß die Ergebnisse vorliegender Arbeit kurz zusammen, so sehen wir bestätigt, daß eine durchdringende Strahlung überall existiert. Diese erzeugt im Kubikzentimeter der atmosphärischen Luft normalen Drucks und 0^0 Temperatur im Mittel etwa drei Ionen. Sie beeinflußt die atmosphärische Ionisation also nur in geringer Weise, deren Wert bekanntlich ungefähr[56]) 8 bis 10 mal höher liegt, da bei der freien Atmosphäre noch die Emanationen und deren Zerfallsprodukte, die Bodenluft und andere schwächer wirkende Ionisatoren hinzukommen. — Höchst wahrscheinlich rührt diese durchdringende Strahlung von den radioaktiven Substanzen in und auf dem Erdboden her, da die Strahlen in ihren Eigenschaften identisch mit den γ-Strahlen derselben erkannt worden sind. Da die Erdoberfläche nicht überall die gleiche Radiummenge enthält, so wird auch die durchdringende Strahlung ein lokales Verhalten zeigen. In geringer Weise wird sie auch durch radioaktive Stoffe mit bestimmt, die aus der Atmosphäre stammen. Da diese variieren, so erfährt auch die durchdringende Strahlung infolgedessen im Laufe eines Tages, Monats und Jahres Schwankungen. Bei gutem Wetter verlaufen diese regelmäßig. Die durchdringende Strahlung bildet dann eine Periode, deren Maxima gegen Morgen und Abend auftreten, deren Minima um Mittag und Mitternacht liegen. Sie verläuft also in gleicher Weise wie das Potentialgefälle der atmosphärischen Elektrizität und scheint durch dieses bedingt zu sein. — Am deutlichsten tritt die Periode auf an Orten, die dem Erdfelde stark exponiert sind.

Wenn auch diese besprochenen Untersuchungen zahlreicher Beobachter die Natur der durchdringenden Strahlung in der Atmosphäre im wesentlichen aufgeklärt haben, so bleiben doch noch Aufgaben für weitere Arbeiten übrig. Vor allem sind noch Messungen im Ballon und in Meerestiefen nötig, auch solche, die sich über längere Zeiträume zugleich mit simultanen Potentialmessungen hin erstrecken.

Die Mittel für diese Untersuchung sind mir aus der Jagorstiftung in Berlin zur Verfügung gestellt worden. Ich spreche dem Kuratorium derselben hierfür meinen besten Dank aus.

Literatur-Verzeichnis.

[1]) Mém. de l'Académie, Paris 1785.
[2]) Ann. de Chim. et de Phys. (3) 28, 1850.
[3]) Phys. ZS. **2**, 116, 1900.
[4]) Proc. Cambr. Phil. Soc. **11**, 32, 1900; Proc. Royal Soc. **68**, 151, 1901; Phil. Mag. (6) **7**, 681, 1904.
[5]) Würzburger Habilitationsschrift 1904; Haber u. Just, Ann. d. Phys. **4**, 30, 411, 1909.
[6]) Mem. Acc. Bologna (1) **6**, 149, 1904.
[7]) Phil. Mag. (6) **9**, 531, 1905; Jahrbuch d. Radioaktivität u. Elektronik **2**, 434, 1906.
[8]) Phil. Mag. (6) **9**, 530, 1905.
[9]) Ann. d. Phys. **24**, 79, 1907.
[10]) Amer. Journal Sc., Dec. 1907.
[11]) Phys. ZS. **7**, 522, 1906.
[12]) Proc. Cambr. Phil. Soc. **14**, 211, 1907; ebenda **15**, 11, 1909.
[13]) Le Radium **4**, 199, 1907.
[14]) Phys. ZS. **9**, 248, 1908.
[15]) Phil. Mag. (6) **16**, 377, 1908.
[16]) Phys. ZS. **9**, 443, 1908.
[17]) Ebenda **7**, 841—884, 1906; ebenda **8**, 273—277, 1907; ebenda **9**, 289—294, 1908.
[18]) Phys. ZS. **2**, 116—119, 560—563, 1901.
[19]) Phil. Mag. (6) **14**, 773, 1907.
[20]) Sitzungsberichte d. Kaiserl. Akademie d. Wissensch. in Wien, Bd. CX, Abt. IIa, Dez. 1901.
[21]) Phil. Mag. (6) **6**, 235, 1903.
[22]) Proc. Roy. Soc. **69**, 227, 1901.
[23]) Phys. ZS. **3**, 574, 1902.
[24]) Siehe 20.
[25]) Siehe 21.
[26]) Phil. Mag. (6) **7**, 81—95, 1904.
[27]) Die Elektrizität i. Gasen, S. 46, 1904.
[28]) Phil. Mag. (6) **6**, 403, 1903.
[29]) Gockel, Die Luftelektrizität 1908; Mache u. v. Schweidler, Atmosphärische Elektrizität 1909.
[30]) Proc. Roy. Soc. **77**, 78, 80, 1906.
[31]) Phil. Mag. (6) **7**, 140, 1909.
[32]) Ebenda (6) **7**, 146, 1909; Rend. della R. Accad. dei Lincei, Februar, S. 101, 1908; Phys. ZS. **9**, 294, 1908.
[33]) Proc. Roy. Soc. **69**, 277, 1902.
[34]) Phil. Mag. (6) **8**, 556, 1904.
[35]) Siehe 25.
[36]) Phys. Review, No. 4, 1903.
[37]) Phil. Mag. (6) **17**, 216, 1909.
[38]) Ebenda (6) **5**, 707, 1903.

[39]) Amer. Phys. Gesellschaft, Referat, Dez. 1903; Phys. ZS. **5**, 445, 1904.
[40]) Phys. ZS. **9**, 907, 1908.
[41]) Ebenda **6**, 1, 1905.
[42]) Ebenda **10**, 1, 1909.
[43]) Ebenda **9**, 470, 1908.
[44]) Roy. Soc. of Canada, August 1908; Phil. Mag., 6. Februar 1909.
[45]) Proc. Roy. Soc. **68**, 1903.
[46]) Wiss. Beilage d. Jahresbericht. d. Herzogl. Gymnasiums von Wolfenbüttel 1907.
[47]) Phil. Mag. (6) **12**, 760, 1907; Phys. ZS. (6) **8**, 556, 1907.
[48]) Phys. ZS. (6) **9**, 117, 1908.
[49]) Phil. Mag. (6) **9**, 189, 1906; siehe auch 46.
[50]) Mache u. v. Schweidler, S. 168.
[51]) Phil. Mag. (6) **2**, 1907; Nature, 16. April, S. 583, 1906.
[52]) Nature, 26. April, S. 607, 1906.
[53]) Phys. ZS. **9**, 117, 1908.
[54]) Ebenda **7**, 1—4, 1906.
[55]) Ebenda **10**, 1909.
[56]) Rutherford-Aschkinass, S. 539.

Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Jahresbericht des Vereins für Naturwissenschaft zu Braunschweig

Jahr/Year: 1907-1909

Band/Volume: 16_1907-1909

Autor(en)/Author(s): Bergwitz Karl

Artikel/Article: Die y-Strahlung des Erdkörpers und ihr Anteil an der spontanen Ionisierung der Atmosphäre 196-239