Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München.

Band XXXIII. Jahrgang 1903.

München.
Verlag der K. Akademie.
1904.

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

Über die Möglichkeit radioaktivierende Emanationen in flüssiger Luft anzureichern.

Von **H. Ebert.**

(*Eingelaufen 7. März.*)

Von all den merkwürdigen Eigenschaften, welche die radioaktiven Substanzen zeigen, ist unzweifelhaft die eigentümlichste die, dass sie Gasen, welche über sie hinwegstreichen, die Fähigkeit erteilen, selbst wieder radioaktivierende Wirkungen auszuüben, z. B. einer abgeschlossenen Luftmenge eine erhöhte Leitfähigkeit zu erteilen, d. h. in ihr Gasionen zu erzeugen. Dabei wird die Wirkung übertragen durch ein vom Gase mitgeführtes Etwas, welches augenscheinlich an sich zunächst elektrisch neutral ist; denn beim Passieren eines elektrischen Feldes von noch so starkem Spannungsgefälle geht die Wirkung nicht verloren, während negativ oder positiv elektrisch geladene Teilchen an den Begrenzungsflächen des Feldes ausgeschieden werden würden. Man hat dieses Etwas „Emanation" genannt; unentschieden ist noch, ob man sich dieselbe als einen Stoff etwa von der Natur der in der Luft von Ramsay entdeckten Edelgase zu denken hat (Rutherford), oder als einen Zustand, der eine spezielle die Emanation kennzeichnende Form von Energie repräsentiert (P. Curie und A. Debierne).

Das Studium dieser Emanationen verdient darum ein besonderes Interesse, weil es ganz sicher ist, dass auch die Bildung der in der freien Atmosphäre angetroffenen Gasionen zum Teil wenigstens auf die Wirkung gewisser derartiger Emanationen zurückzuführen ist.

Elster und Geitel wiesen nach, dass die den Erdkapillaren entstammende Bodenluft in hohem Grade aktivierende Wirkungen äussert, so dass in Höhlen oder Kellerräumen abgeschlossene ruhende Luft, zu der sie hinzutritt, abnorm hohe Werte der Leitfähigkeit annimmt. Ihnen gelang auch der Nachweis, dass sich die radioaktivierende Wirkung auf negativ geladenen in solcher Luft aufgestellten Körpern ansammeln lasse, eine Erscheinung, die nach Rutherford besonders charakteristisch für die vorhergegangene Wirkung einer Emanation ist. Ebert und Ewers haben dann ganz direkt nachgewiesen, dass die Bodenluft zwar arm an bereits vorhandenen Ionen, aber reich an einer elektrisch neutralen Emanation ist, welche in einer abgeschlossenen Luftprobe der freien Atmosphäre, die mit ihr infiziert wird, sehr bald eine weit über das normale Mass gesteigerte Ionenbildung wachruft. Was hier im Kleinen verfolgt wurde, muss sich im Grossen auch in der Atmosphäre abspielen, wenn bei sinkendem Barometerstande Bodenluft aus der Erde heraus und in die untersten atmosphärischen Schichten eindringt.

Fast gleichzeitig haben Sella und Pocchettino sowie J. J. Thomson gefunden, dass sich beim Schütteln von Luft und Wasser eine Emanation bildet, welche besonders deutlich auftritt, wenn eine abgegrenzte Luftmasse in einem Wassertrommelgebläse mit einer grossen Menge Wasserleitungswasser wiederholt in innige Berührung getreten ist. Es hat den Anschein, als ob das Wasser Träger einer gewissen, wenn auch äusserst schwachen und direkt nicht nachweisbaren Radioaktivität sei, welche ihre Wirkung der Luft in Form einer in dieser erzeugten Emanation mitteile. Die Frage ist nicht von der Hand zu weisen, ob nicht die beiden genannten Erscheinungen in einem gewissen Zusammenhange stehen, und die Bodenemanation nicht zum Teil oder ganz ihr Entstehen den in den Erdkapillaren zirkulierenden Bodenwässern verdankt. Haben doch C. T. R. Wilson und später Allan nachgewiesen, dass frisch gefallenes Regenwasser bezw. frischer Schnee einen Rückstand oder Niederschlag hinterlassen, der deutliche, wenn

auch schnell abklingende radioaktivierende Wirkungen zeigt. Dringt diese radioaktive Substanz mit den Sickerwässern in den Boden ein, so vermag sie in der hier stagnierenden Luft die Emanation hervorzurufen. Freilich könnten auch schwach aktive mineralische Bestandteile direkt die Ursache derselben sein, deren Wirkung durch die Länge der Zeit, während welcher die Bodenluft ihrer Strahlung ausgesetzt ist, gesteigert wird.

Ueber diese Fragen ebenso wie über die nach der Natur der Emanationen überhaupt wird man erst zur völligen Klärung gelangen, wenn man die Emanationen verschiedenen Ursprungs deutlich voneinander zu unterscheiden vermag. Das wesentlichste Unterscheidungsmerkmal liegt in dem Grade, in welchem eine Emanation eine gegebene Luftmenge elektrisch leitend macht und dem Gesetze, nach welchem diese Wirkung mit der Zeit abklingt. Man kann beides durch eine einfache Beziehung zum Ausdruck bringen, in welcher gewisse Konstanten auftreten, welche als charakteristisch für eine bestimmte Emanation anzusehen sind, vergl. w. u.

Bei den in der Atmosphäre wirksamen Emanationen stösst man auf die grosse Schwierigkeit, dass diese unter gewöhnlichen Umständen nur in äusserst verdünnter Form in der Luft enthalten sind. Bringt man also eine gewisse Luftmenge unter eine Glocke, so hat man zwar auch eine bestimmte Menge der Emanation mit eingeschlossen, aber diese Menge ist so gering, dass ihre Wirkung vollkommen durch diejenige der Gefässwände z. B. überdeckt werden kann.

Seit länger als Jahresfrist sind bei mir in dem physikalischen Institute der Technischen Hochschule zu München Untersuchungen im Gange, welche zeigen, dass sich die radioaktivierenden Emanationen der natürlichen Luft ebenso wie die der Bodenluft und der mit Wasser geschüttelten Luft durch Verflüssigung anreichern und darin für längere Dauer in nahezu ungeschwächter Wirksamkeit erhalten lassen. Aus zahlreichen Einzeluntersuchungen hat sich auf dem im folgenden näher geschilderten Wege allmählich die folgende Methode herausgebildet: Lässt man eine grössere Menge mittels der

Lindemaschine verflüssigter Luft (gewöhnlich wurden 2 Liter benutzt) in einer doppelwandigen Dewarschen Vacuumflasche unter vermindertem Drucke sieden, indem man die Verdampfungsprodukte (mittels gekoppelter Wasserstrahlpumpen, einer durch Elektromotor betriebenen Bianchi- oder Gerykpumpe) rasch absaugt, so kann man leicht Temperaturen unter — 200° C. erreichen. Baut man also in die Dewarflasche ein Kondensationsgefäss ein, welches mit der Aussenluft oder der zu untersuchenden, in einem grossen Glockengasometer enthaltenen Luft kommuniziert, so kann man von dieser beliebige Mengen zu Flüssigkeit verdichten (Siedepunkt bei normalem Druck von — 192° bis — 182° je nach der Zusammensetzung). Durch eine geeignete Heberanordnung kann man von Zeit zu Zeit Proben der verflüssigten Luft entnehmen. Wenn nun auch diese Luft wieder verdampft, so lässt sich doch folgendes nachweisen:

1. Die aus der verflüssigten Luft aufsteigenden Verdampfungsprodukte nehmen die Emanation *nicht* mit, diese verbleibt vielmehr in dem Verdampfungsrückstande.

2. Die Wirksamkeit der Emanation klingt bei der Temperatur der flüssigen Luft mit der Zeit nur sehr langsam ab, bei weitem nicht so schnell, als man die Luft selbst verdampfen lassen kann.

Wenn man daher immer neue Luftmengen kondensiert und das Kondensat durch Stehenlassen eindampft, so reichert sich die Emanation immer mehr an und kann auf kleinstem Raume zusammengedrängt zu weiterer Untersuchung verwendet werden, falls man nur dafür Sorge trägt, dass in der Sammelflasche immer noch eine kleine Menge flüssiger Luft verbleibt. Denn erst wenn diese vollkommen verdampft ist, bei einer Temperatur, die augenscheinlich wesentlich höher liegt als der Verdampfungspunkt der flüssigen Luft, geht auch die Emanation in den umgebenden Gasraum mit über, hier ihre ionenbildende Wirksamkeit äussernd. Man kann geradezu von einer bestimmten Verdampfungstemperatur der

Emanation sprechen; sollte sich zeigen, dass die Emanationen verschiedener Herkunft verschiedene und wohlcharakterisierte Verdampfungspunkte aufweisen, so wäre damit ein neues und sehr wichtiges Unterscheidungsmittel für dieselben gewonnen.

Der Gang der Untersuchnng ist hiernach kurz folgender: Eine bestimmte Literzahl der zu prüfenden Luft (Frischluft, Bodenluft, Kellerluft, mit Wasser geschüttelter Luft, Regenluft) wird verflüssigt, die Flüssigkeit bis zu einer bestimmten cbcm-Zahl eingedampft und dann durch ein System von Absorptionsmitteln (Kalilauge, Chromsäure, Schwefelsäure) und ein starkes zwischen zwei konachsialen Zylindern dauernd erhaltenes elektrisches Feld (zur Wegnahme aller etwa bereits vorhandener, elektrisch nicht neutraler Beimengungen) in eine grosse Glasglocke von 60 Liter Inhalt verdampft, die vorher gut mit frischer, direkt dem Freien entnommener Luft ausgespült war; unter die Glocke ist ein Elster-Geitelscher Zerstreuungsapparat eingebaut, mit dessen Hilfe die Leitfähigkeit vor und nach dem Einlassen der verdampften Luft gemessen wird.

Statt in einem besonderen Hilfsgefässe zu kondensieren, kann man natürlich auch die Luftverflüssigungsmaschine direkt verwenden und in dieser Weise wurden die ersten Versuchsreihen auch ausgeführt.

Ich habe das geschilderte Verfahren seither in ausgedehntem Masse besonders zum Studium derjenigen Emanationen verwendet, welche für das Zustandekommen der Ionenführung der freien Atmosphäre und damit der luftelektrischen Erscheinungen in erster Linie in Betracht kommen. Dabei bin ich vielfach von den Herren Gelehrten und Ingenieuren der Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, Abteilung für Gasverflüssigungen in München-Höllriegelskreuth, aufs wirksamste unterstützt worden, welche die Verdampfungsrückstände auch jener grossen Mengen flüssiger Luft, die in ihrem Betriebe verwendet werden, für mich sammelten; ich danke den genannten Herren, namentlich Herrn Dr. Linde und Herrn Dr. Sieder, auch an dieser Stelle.

Durch ein Referat in der Naturwissenschaftlichen Rund-

schau wurde ich dieser Tage darauf aufmerksam gemacht, dass es den Herren Rutherford und Soddy gelungen ist, auch die radioaktivierenden Emanationen von Thor- und Radiumverbindungen in ähnlicher Weise in flüssiger Luft festzuhalten.[1]) Desgleichen berühren sich meine Untersuchungen in einem Punkte mit denen von P. Curie, der zeigte, dass die von Radiumsalzen ausgehende, in einem zugeschmolzenen Glasröhrchen aufbewahrte Wirkung auch noch bei der Temperatur der flüssigen Luft fortbesteht und hier mit derselben Zeitkonstante abklingt wie bei gewöhnlicher oder bei sehr viel höherer Temperatur.

Nach dieser orientierenden Uebersicht über das von mir eingeschlagene Verfahren gehe ich zur Mitteilung der Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen über.

1. Im Herbste 1901 veranlasste ich den in meinem Laboratorium über die spontane Ionisierung verschiedener unter einer Glasglocke von ca. 60 Liter Inhalt eingeschlossener Gase nach der Methode von H. Geitel und J. Elster und H. Geitel[2]) arbeitenden cand. phys. et math. Karl Ruf[3]) gelegentlich auch grössere oder kleinere Quantitäten flüssiger Luft unter der Glocke verdampfen zu lassen, wobei die Verdampfungsprodukte durch einen oben an dem dauernd geerdeten metallenen Verschlussstücke der Glocke angebrachten Hahn entweichen konnten. Dabei zeigte sich an dem unter der Glocke aufgestellten, gegen äussere elektrische Einwirkungen genügend geschützten und durch eine luftdicht eingeführte Sonde von aussen her zu ladenden Elster-Geitelschen Zerstreuungsapparate regelmässig folgendes: Die Zerstreuung blieb durchaus die normale, während die flüssige Luft verdampfte; dagegen stiegen

---

[1]) E. Rutherford und F. Soddy, Proceedings of the Chemical Soc. **18**, 219, 1902; Naturw. Rundschau **18**, 111, Nr. 9, 1903.

[2]) H. Geitel, Physikal. Zeitschrift **2**, 116, 1900 und J. Elster und H. Geitel, ebenda **2**, 560, 1901.

[3]) Vergl. H. Ebert: Bericht über die in München im Jahre 1901/1902 ausgeführten luftelektrischen Arbeiten. Nachr. der Göttinger Ges. der W. math.-phys. Kl., Heft 3, S. 10, 1902.

die Zerstreuungswerte für beide Vorzeichen stark an, unmittelbar nachdem der letzte Rest der flüssigen Luft verdampft war. Von dieser Erscheinung bin ich, nachdem Herr Ruf seine auf andere Ziele gerichtete Arbeit abgeschlossen hatte, ausgegangen. Zunächst war durch einige Vorversuche festzustellen, ob die ionisierende Wirkung nicht etwa nur eine Begleiterscheinung des Verdampfungsprozesses sei, und ob sie wirklich ihren Sitz in der flüssigen Luft selbst habe.

2. Man könnte in der Tat meinen, dass der Prozess des heftigen Siedens der flüssigen Luft allein schon einen unmittelbaren Einfluss auf die elektrischen Vorgänge unter der Glocke haben könnte. Aber auch wenn das Siedegefäss ausserhalb der Glocke sich befindet und durch eine Saugpumpe nur die Verdampfungsprodukte durch die Glocke gesaugt werden, zeigt sich dieselbe Erscheinung: so lange die Luft siedet, tritt keine Erhöhung der Zerstreuung ein, unmittelbar danach steigt deren Betrag an; erst ganz allmählich, nach vielen Tagen, stellt sich der ursprüngliche Zustand wieder her.

3. Weiter könnte man geneigt sein, die Erscheinung auf die elektrischen Erregungen zurückzuführen, welche beim Versieden flüssiger Luft, die mit Eispartikelchen vermengt ist, aufzutreten pflegen;[1]) das Eis wird dabei positiv elektrisch, die von ihm geriebenen Gegenstände negativ. Man könnte denken, dass so lange noch flüssige Luft vorhanden ist, durch Reiben zwar immer neue Ladungen geschaffen werden, dass sie sich aber nicht ausgleichen können, da die flüssige Luft ein vorzüglicher Isolator ist. Ist diese verdampft, so könnten etwa kleine Fünkchen zwischen den geladenen Partikelchen verschiedenen Vorzeichens den Ausgleich herbeiführen, und dabei Ionen bilden, welche dann in die Glocke eingesaugt die

---

[1]) Vergl. H. Ebert und B. Hoffmann: Elektrizitätserregung in flüssiger Luft; diese Berichte 30, 1, 1900 und Annalen der Physik, 2, 706, 1900.

besprochene Erscheinung bedingen. Wenn man aber direkt die Luft aus der Umgebung einer zwischen Spitze und Platte übergehenden kleinen Funkenstrecke absaugt, so erhält man wohl die Erscheinung einer vorübergehenden Ionenführung, nicht aber das nachträgliche Ansteigen des elektrischen Leitvermögens der Luft, wie es eine Emanation hervor zu bringen vermag.

Nach unseren früheren Erfahrungen kann man übrigens die Elektrisierung durch Eisreibung fast vollkommen eliminieren, wenn man die flüssige Luft vorher filtriert. Nun zeigte sich kein Unterschied, ob man sorgfältig filtrierte flüssige Luft verwendete oder Luft, die nicht filtriert, oder durch Anhauchen sogar noch besonders reich an Eis- und Kohlensäurepartikelchen gemacht worden war. Die Eisreibung konnte also nicht die Ursache der starken Luftionisierung sein, ebensowenig der Kohlensäuregehalt der nicht gereinigten Luft.

Um indessen nach dem Verdampfen weder diesen noch Wasserdampf in den Versuchsraum zu bekommen, wurde bei allen weiteren Versuchen die verwendete flüssige Luft unmittelbar vor dem Einbringen noch einmal auf das Sorgfältigste durch Fliesspapier hindurch filtriert.

4. Für die weiter ausgedehnten Messungsreihen war die Versuchsanordnung vor allem so zu treffen, dass kein störendes elektrisches Feld das eingeschlossene Luftquantum dauernd beeinflussen konnte; denn es ist bekannt, wie stark die Ionenführung einer ruhenden Luftmasse selbst durch sehr kleine elektromotorische Kräfte, wenn sie nur genügend lange zur Wirksamkeit gelangen, beeinflussbar ist.[1]) Daher wurde zunächst das verwendete kleine zylindrische Dewargefäss von 110 cbcm Inhalt ebenfalls möglichst gut elektrostatisch geschützt. Dasselbe war vollkommen mit Stanniol umkleidet, aus dem nur vorn ein längerer, rückwärts ein kürzerer schmaler Streifen ausgeschnitten war, damit das Verdampfen der Luft von aussen her verfolgt werden konnte. Das Gefäss

---

[1]) Vergl. z. B. H. Geitel in der oben S. 138 genannten Arbeit.

selbst wurde von einem Drahtgestelle gehalten, das auf einen messingenen Untersatz mit Rand aufgelötet war. Ueber das Ganze wurde ein oben und an den Seiten völlig geschlossener Sturz aus Drahtgaze von nur 0,3 mm Maschenweite gestülpt; das so geschützte Gefäss wurde auf die metallene Grundplatte, auf der auch der Zerstreuungsapparat stand, gesetzt und mit dieser dauernd gut geerdet. Wie bei Elster und Geitel war der auf der Grundplatte stehende Zerstreuungsapparat (ohne Schutzdach) von einem auf derselben Platte stehenden grossen engmaschigen Messingdrahtkäfig, der die Innenwände der Glocke bekleidete, umgeben; nur oben war eine kleine Oeffnung zum Einführen der Sonde beim Laden und an der Seite eine vergitterte Oeffnung zum Ablesen der Elektroskopskala frei gelassen.

Dass der elektrostatische Schutz ein vollkommener war, wurde durch besondere Versuche mit einer grossen Influenzmaschine erwiesen.

Gemessen wurde jedesmal der Spannungsverlust in Volt, welchen der Zerstreuungskörper bei + und bei — Ladung in 15 Minuten erlitt; erfolgte die Entladung so schnell, dass nur 10 oder nur 5 Minuten lang der Elektrizitätsverlust verfolgt werden konnte, so wurden die erhaltenen Zahlen des Vergleichs halber immer auf 15 Minuten umgerechnet. Diese Werte geben ein Mass für die Zahl der zur Beobachtungszeit in dem Versuchsraume vorhandenen freien — und + Ionen. Unmittelbar nach diesen Zerstreuungsmessungen wurde die während derselben hoch gezogene Sonde wieder bis zur Berührung mit dem Zerstreuungskörper herabgelassen, so dass dieser sich mit seiner Umgebung immer auf gleichem Potentiale befand.

An die Glocke war noch ein Quecksilbermanometer angeschlossen, in ihr ein Thermometer befestigt. Direktes Sonnenlicht wurde vom Apparate fern gehalten.

5. Die verschiedenen Versuchsreihen, von denen sich die meisten über mehrere Wochen erstreckten, wurden durch Pausen unterbrochen, während deren die Glocke sowie alle unter ihr aufgestellten Gegenstände sorgfältig geputzt und ausgelüftet wurden; es ist bekannt, dass die Wände eines Raumes, der eine

kräftig wirksame Emanation oder eine sehr ionenreiche Luft enthalten hat, selbst nach Entfernung derselben noch längere Zeit induzierte radioaktivierende Wirkungen auf die in ihn eingeführte frische Luft ausüben, so dass die folgenden Versuchsreihen durch die vorhergehenden gestört werden können. Diese Pausen wurden gleichzeitig dazu benutzt um die Isolation des Elektroskopes bei abgenommenem Zerstreuungskörper zu prüfen. Dieselbe war — wohl Dank auch der Natriumtrocknung — dauernd eine so vorzügliche, dass der Isolationsverlust nur etwa 1 Volt pro Stunde betrug, also bei den viertelstündigen Zerstreuungszeiten als innerhalb der Fehlergrenze fallend vernachlässigt werden konnte.

Nach dem Zusammensetzen des Apparates ergaben sich in der eingeschlossenen frischen Luft je nach der Jahreszeit Zerstreuungen von 11 bis 17 Volt pro 15 Minuten und zwar für beide Vorzeichen nahezu die gleichen Werte. Wurde die Luft sich selbst überlassen, so stieg die Zerstreuung allmählich an, um Maxima von etwa 23 bis 34 zu erreichen, die dann dauernd beibehalten wurden. Es sind dies die durch spontane Ionisierung in der abgeschlossenen Luft zu erreichenden Werte; dieselben werden erst nach tagelangem Stehen erreicht.

6. Um zunächst zu entscheiden in wie weit sich die aktivierende Wirkung in der flüssigen Luft anreichern und konservieren lasse, wurden Versuche in der folgenden Weise angestellt: Mit Hilfe der Luftverflüssigungsmaschine des Institutes wurde eine grössere Menge flüssiger Luft, gewöhnlich 6 bis 7 Liter, unmittelbar hintereinander hergestellt. Von dieser wurden 107 cbcm unmittelbar nach der Bereitung in dem Dewargefässe unter die Glasglocke gebracht und die durch sie herbeigeführte Erhöhung der Zerstreuungswerte, namentlich aber auch die Art des Wiederabklingens derselben wochenlang verfolgt. Unterdessen verdampfte die übrige gleichzeitig bereitete flüssige Luft allmählich mehr und mehr; es wurden aber die Reste der einzelnen Flaschen immer in eine einzige Sammelflasche zusammengegossen, so dass sich in dieser die Verdampfungsrückstände immer mehr anreicherten. Als dieser Rest auf

etwa 150 cbcm eingedampft war, wurden von ihm abermals 107 cbcm in das Dewarfläschchen gegossen und der durch diese herbeigeführte Gang der Zerstreuungen nach sorgfältig wieder gereinigter und gelüfteter Glocke untersucht.

Zur Erläuterung diene der folgende einzelne Fall:

a) Frische Luft. Dieselbe war infolge ihres Reichtums an Stickstoff wasserklar und siedete ziemlich heftig. Die Zerstreuung war unmittelbar nach dem Aufsetzen der Glocke 18 für + und 14 für — und ging zunächst etwas (bis auf 13) zurück; dieser fast immer beobachtete anfängliche Rückgang der Zerstreuung beruht vielleicht auf einer schwachen Nebelbildung in den durch das Einbringen der flüssigen Luft stark abgekühlten nächsten Luftschichten. Nach ca. drei Stunden war alles verdampft, die Zerstreuung war 18 für +, 19 für —. Nun beginnt ein Steigen, so dass schon nach 8 Stunden nach dem Schliessen der Glocke, 5 Stunden nach dem Verdampfen des letzten flüssigen Restes, die Zerstreuung auf 21 bezw. 23 gewachsen ist, während sie bei spontaner Ionisierung erst Werte von höchstens 18 bis 19 Volt in dieser Zeit erreicht haben würde. Nach 30 Stunden war 26 bezw. 30 erreicht, nach 127 Stunden 33 und 37, Werte, die sich nur noch wenig erhöhten, so dass nach 173 Stunden, also nach $7\frac{1}{4}$ Tagen, 37 für +, 39 für — erreicht war.

b) Gealterte Luft. Diese hatte eine intensiv blaue Färbung, da fast aller Stickstoff aus ihr verdampft war und sie vorwiegend nur noch aus Sauerstoff bestand. Sie siedete nur noch schwach; es dauerte $4\frac{1}{2}$ Stunden, bis die in dem Dewargefäss unter die Glocke gestellten 107 cbcm völlig verdampft waren. Die Zerstreuung war anfangs 15 bezw. 14, bei einer zweiten eine Stunde nach dem Einbringen der flüssigen Luft angestellten Messung 14 für beide Vorzeichen. Unmittelbar nach dem Verdampfen des letzten Restes stieg die Zerstreuung auf 71 für + wie für — an, wuchs also auf den fünffachen Betrag und strebte schnell einem Maximum von 81 zu, welches $11\frac{1}{2}$ Stunden nach dem Abschliessen der Luft, also schon 7 Stunden nach dem Verdampfen des letzten Restes erreicht war.

Von diesem Maximalwerte sanken die Zerstreuungswerte erst rasch, dann aber immer langsamer und langsamer herab; nach 40 Stunden konnte noch immer 65 für + und 69 für — gemessen werden, nach 100 Stunden noch 63 bezw. 68. Die Untersuchung wurde 410 Stunden lang fortgesetzt, nach welcher Zeit die Zerstreuung noch 39 bezw. 44 betrug. Dies sind Werte, gegen welche die Reihe a) hinstrebt, wenn man sie sich bis zu dieser Dauer verlängert denkt; bemerkenswerter Weise liegen diese Werte noch immer etwa doppelt so hoch, als wenn die während der betreffenden Jahreszeit eingesogene Frischluft vollkommen sich selbst überlassen geblieben und sie nicht mit einem ionisierenden Agens versetzt worden wäre.

Die Lindemaschine des Institutes ist so aufgestellt, dass dieselbe die Luft aus dem Laboratorium entnimmt und verflüssigt. Diese Luft gibt, unter der Glocke abgesperrt, nach sehr langem Stehen Ladungsverluste von nur 20 Volt für — Ladungen und von 19 Volt für + Ladungen in der üblichen Beobachtungszeit von 15 Minuten. Sie enthält also keine merklichen Verunreinigungen durch Thorerdestaub oder andere radioaktive Präparate.

Der beschriebene Doppelversuch lehrt:

α) Frisch bereitete flüssige Luft enthält einen Bestandteil (oder einen Zustand), der erst nach völligem Verdampfen derselben frei wird (vergast oder verdampft), welcher die Fähigkeit besitzt, in abgeschlossener, ruhender, vor allen äusseren elektrischen Wirkungen geschützter Luft freie elektrische Ionen beiderlei Vorzeichens hervorzubringen und zwar weit rascher und in merklich grösserem Betrage, als die gasförmige Luft aus sich selbst heraus zu entwickeln im Stande ist, etwa infolge eines in ihr selbst normal enthaltenen radioaktiven Bestandteils oder schwacher Strahlungen, die von den Gefässwänden ausgehend zu denken sind.

β) Dieser Bestandteil oder Zustand behält seine radioaktivierende Wirkung in der flüssigen Luft, so

dass diese bei dem allmählichen Eindampfen prozentual reicher an demselben wird.

γ) Diese Anreicherung gibt sich sofort kund, sowie ein bestimmtes Volumen flüssiger Luft einem gegebenen Quantum gasförmiger, unter normalen Bedingungen befindlicher Luft beigegeben wird: die gealterte Luft erhöht nach dem Verdampfen die Leitfähigkeit der Luft plötzlich um ein Vielfaches des normalen, spontan nach langer Zeit erworbenen Betrages, die frische Luft erreicht dies erst ganz allmählich nach längerer Zeit.

δ) Ist jener Bestandteil aber erst einmal in die Gas- oder Dampfform übergegangen, oder hat sich der als wirksam zu betrachtende Zustand dem Gase mitgeteilt, so klingt seine Wirkung namentlich im Anfange rasch ab; derselbe hält sich also in der gasförmigen Luft nicht; hier wird seine Energie augenscheinlich bei dem Ionisierungsprozesse selbst erschöpft.

7. Angesichts dieser Ergebnisse wird man zunächst an die wenigst flüchtigen Bestandteile der Luft als die möglichen Träger der Wirkung denken können. Eis und Kohlensäure sind nach den Ausführungen S. 140 bereits ausgeschlossen. Aber man könnte an die Edelgase Krypton und Xenon denken, deren Siedepunkte oberhalb desjenigen des Sauerstoffs liegen (Sauerstoff — 182,5, Krypton — 151,67, Xenon — 109,1 nach Ramsay und Travers), welche also erst merklich verdampfen, wenn der Sauerstoff völlig vergast ist und die sich in alternder flüssiger Luft mehr und mehr anreichern. In der Tat bieten ja gerade in elektrischer Beziehung die Edelgase so viele Eigentümlichkeiten, dass die Vermutung nicht von der Hand zu weisen ist, dass ihnen auch bei der Ionisierung der Atmosphäre eine besondere Rolle zufalle. Um hierüber Aufschluss zu erhalten, stellte ich Verdampfungsversuche mit Rückständen an, welche mir, wie oben S. 137 erwähnt, die Linde-

gesellschaft zur Verfügung stellte und die meist von vielen Hunderten von Litern verflüssigter Luft zurückgeblieben waren.

Indessen zeigte sich ein Ansteigen der Zerstreuungskurven, wie es dem Gehalte an Edelgasen entsprochen hätte, bei diesen Proben durchaus nicht. Ein Beispiel möge dies erläutern:

Am 1. September 1902 erhielt ich den Verdampfungsrückstand von ca. 300 Litern flüssiger Luft zur Verfügung gestellt. Die Farbe desselben war tief himmelblau, fast grünbläulich; die Olszewskischen vier Absorptions-Banden waren selbst in sehr dünner Schicht schon deutlich zu erkennen; die Flüssigkeit bestand demnach fast nur noch aus verflüssigtem Sauerstoff mit Argon, Krypton und Xenon. Das Sieden im Dewargefäss war äusserst schwach. Die Zerstreuung, die anfangs 20 bezw. 19 für + und — gewesen war, stieg nach vier Stunden auf 25 bezw. 40, nach 15 Stunden auf 52 und 54 an und erreichte ganz allmählich die Höchstwerte 53 und 56, von welchen die Zerstreuung ganz langsam herabsank. Die Beobachtungsreihe wurde 506 Stunden lang fortgesetzt und es war interessant zu sehen, wie die Endwerte ganz allmählich in dieselben Beträge übergingen, wie bei der von uns im Laboratorium mit unserer Maschine verflüssigten Luft, trotz der ganz verschiedenen Anfangswerte der einzelnen Reihen.

Verschiedentlich wurden auch direkte Versuche mit Edelgasen angestellt, indem grössere oder kleinere Beträge von Helium, Argon oder Krypton unter die Glocke gelassen wurden, die freilich noch nicht vollkommen gereinigt waren. Es zeigte sich niemals eine merkliche ionisierende Wirkung. Allerdings sind diese Versuche nicht vollkommen beweiskräftig, da immer nur verhältnismässig recht geringe Mengen der genannten Edelgase verwendet werden konnten; die Versuche nach dieser Richtung werden daher augenblicklich mit grösseren Mengen fortgesetzt.

8. Weiter aber war die Möglichkeit nicht ganz ausgeschlossen, dass in der Lindemaschine selbst die Ursache der

Aktivierungen zu suchen sei, und dass diese nur durch den Verflüssigungsprozess zu der beobachteten Wirksamkeit gebracht würden. Wenn das Material der dreifachen, ineinander steckenden Kupferrohrspiralen des Gegenstromapparates auch nur ganz schwache Becquerelstrahlungen aussenden sollte, so wäre die soeben besprochene Verschiedenheit der Luftproben verständlich. Es war daher erwünscht, bestimmte Luftmengen zu verflüssigen, ohne den Lindeapparat mit denselben passieren zu müssen. Dies gelingt, wenn man die von der Maschine gelieferte flüssige Luft nur als Kältemittel benutzt und mit ihrer Hilfe die zu untersuchende Luftprobe kondensiert. Eine weithalsige Zweiliter-Dewarflasche wurde durch einen grossen Kautschukstopfen geschlossen, durch dessen eine Bohrung die in der Flasche enthaltene verdampfende flüssige Luft durch eine Luftpumpe abgesaugt wurde; dadurch konnte die Siedetemperatur bis auf — 200° herabgezogen werden. Durch die andere, weitere Bohrung war der Hals eines unten kolbenförmig erweiterten, in die flüssige Luft tauchenden Gefässes gesteckt, welches oben durch einen wiederum doppelt durchbohrten Stopfen geschlossen war. Durch denselben ging einerseits ein kurzes, schon im Gefässhalse endendes Rohr hindurch, andererseits ein bis zum Boden des Gefässes reichendes längeres Rohr. Auf die beiden äusseren Rohrenden waren Gummischläuche gesteckt, die durch Quetschhähne verschliessbar waren. An dem Aufgeblasen- oder Zusammengedrücktwerden der Schläuche ersieht man, ob Über- oder Unterdruck in dem Gefässe herrscht. Wird das längere Rohr zunächst geschlossen gehalten, so kann durch das kürzere Rohr Luft einströmen, welche in das Gefäss hinein kondensiert. Hat man genügend viel verflüssigte Luft in diesem angesammelt, so schliesst man das kürzere, stellt die Pumpe ab, stellt wieder Atmosphärendruck in dem Kühlgefässe her und hebt eventuell das Kondensationsgefäss etwas aus der Dewarflasche heraus; der Druck über dem Kondensat steigt und treibt die Flüssigkeit durch das bis auf den Boden reichende längere Rohr wie bei einem Siphon hinaus. Man lässt sie durch ein Filter gehen, fängt sie in dem

kleinen zylindrischen Dewargefässe auf und bringt sie unter die Zerstreuungsglocke.

Hier kommt die verflüssigte Luftprobe weder mit der Maschine noch mit der aus dieser hervorgegangenen flüssigen Luft in Berührung.

9. Von den verschiedenen Luftproben, die nach dieser Methode untersucht wurden, verdient die dem Erdboden entnommene Bodenluft ein besonderes Interesse. In der in einer Arbeit von mir und Dr. P. Ewers[1]) näher angegebenen Weise wurde Bodenluft aus den Erdkapillaren des Institutsgartens in ein grösseres Glockengasometer angesaugt und von diesem in das Kondensationsgefäss übergeführt; zwei Gasometerfüllungen von je 35 Liter Bodenluft gaben 56 cbcm flüssige Luft in dem Dewargefässchen unter der Glasglocke, also nur etwa halb so viel als bei den in 3. und 4. beschriebenen Versuchen verwendet wurde. Nichtsdestoweniger stieg die Zerstreuung von 14 auf 156 für +, 192 für — bereits nach einer Stunde. Nach vier Stunden wurden die Höchstwerte 850 und 870 erreicht, dann erfolgt das allmähliche Abklingen in der gewöhnlichen Weise, doch waren noch nach 265 Stunden Zerstreuungen von 144 bezw. 150 zu konstatieren. Vergleicht man diese Zahlen mit den beim direkten Einleiten der Bodenluft in die Glocke erhaltenen Werten (vgl. die oben genannte Arbeit S. 163), so sieht man, dass die Abkühlung der Bodenluft auf — 200° der aktivierenden Wirksamkeit derselben keinen Abbruch tut, sondern dass dieselbe beim verflüssigten Zustande gewissermassen latent weiter existiert und sofort wieder in Wirksamkeit tritt, wenn das Kondensat wieder verdampft.

Verglichen mit den oben angeführten Reihen ergeben sich hier enorm hohe Zerstreuungen, was darauf hinweist, dass es nicht die flüssige Luft an sich ist, welche die radioaktivierenden Wirkungen enthält, sondern dass sie nur als Konservator der in der Luft bereits vorhandenen wirkenden Teilchen aufzufassen

---

[1]) H. Ebert und P. Ewers, Physikal. Zeitschrift 4, 162, 1902.

ist. Auch die in 7. erörterte Ansicht, dass es nicht die Edelgase an sich sind, deren Menge in der flüssigen Luft das Bestimmende ist, wird durch die vorliegenden Ergebnisse gestützt; denn es liegt kein Grund zu der Annahme vor, dass die Bodenluft besonders reich an Krypton oder Xenon ist.

Die Unterschiede der in unserem Laboratorium und dem der Lindegesellschaft verflüssigten Luftproben (vergl. S. 146) dürfte sich daraus erklären, dass bei uns die Lindemaschine in einem tief gelegenen Parterreraum untergebracht, und die aspirierte Luft daher reicher an stagnierender Keller- und Bodenluft ist als draussen in der auf freiem Felde erbauten Höllriegelskreuther Versuchsstation der genannten Gesellschaft.

10. Bei den oben (9.) angeführten Studien über die Bodenluft konnte der Nachweis geführt werden, dass die dem Erdboden direkt entnommene Luft an sich zunächst nur ein geringes Leitvermögen besitzt, dass sie also nur wenig freie Ionen mitbringt, dass sie dagegen das Vermögen besitzt, solche zu erzeugen, entweder in sich selbst oder in einer ruhenden Luftmasse, der sie beigemischt wird. Eine ähnliche Frage war auch hier von Interesse. Es handelte sich darum, festzustellen: Sind freie Ionen bereits in der flüssigen Luft enthalten, die beim Verdampfen derselben wieder in die Atmosphäre übergehen oder entweicht aus ihr nur eine Emanation, die an sich elektrisch indifferent ist, die aber sekundär in der ruhenden Luft Ionen zu erzeugen vermag?

Dies liess sich entscheiden, indem man die verdampfende flüssige Luft vor dem Eintritt in den Versuchsraum durch ein starkes elektrostatisches Feld gehen lässt. Die Luft wurde ausserhalb verdampft. Damit aber die Anordnung im übrigen der vorher benutzten völlig glich, wurde das kleine Dewargefäss mit seinem Metallgazemantel unter der Glocke belassen. Zwischen das Verdampfungsgefäss und die Glocke wurde der schon früher (a. a. O. S. 164) benutzte Zylinderkondensator eingeschaltet, zwischen dessen beiden Belegen eine Hochspannungssäule ein hohes Spannungsgefälle unterhielt. War die Wirksamkeit der verdampfenden Luft an den Übertritt

elektrisch geladener Teilchen gebunden, so musste sich die Wirkung durch die Zwischenschaltung des Spannungsrohres wesentlich vermindern. Doch wurde nichts dergleichen bemerkt. Es scheint daher in der flüssigen Luft nur eine Emanation gebunden zu sein, nicht aber freie Ionen.

In der Tat schlugen auch Versuche fehl, negativ geladene, in flüssiger Luft hängende Drähte zu aktivieren oder an der Kathode eines eingetauchten Elektrodenpaares eine Anreicherung der aktivierenden Wirkung zu erzielen. Auch gelang es nicht, eine von flüssiger Luft etwa ausgehende Strahlung mit dem Leuchtschirm oder der photographischen Platte mit Sicherheit nachzuweisen.

11. Die bisher beschriebenen Versuchsreihen zeigten, wie sich durch den Verflüssigungsprozess die in der Luft enthaltene Emanation akkumulieren lässt. Es ist aber weiter von Interesse, zu untersuchen, ob die Verflüssigung auch konservierend wirkt, d. h. ob sich die Wirksamkeit der Emanation in dem verflüssigten Zustande länger erhält, als wenn sie in dem gasförmigen Zustande verbleibt. Um hierüber Aufschluss zu erhalten, wurde die folgende Doppelreihe von Messungen mit Bodenluft ausgeführt.

Mittels eines 120 Liter fassenden Glockengasometers wurden 88 Liter Bodenluft entnommen, von denen 75 Liter durch die Glocke geschickt wurden, die vorher gut ausgelüftet und mit frischer Luft durchgespült worden war. In der Frischluft ergaben sich Zerstreuungswerte von nur 24 Volt (pro 15 Minuten) für beide Vorzeichen, vergl. die Fig. 1, welche den zeitlichen Verlauf der ganzen Erscheinung darstellt; als Abscissen ist die Zeit in Stunden, als Ordinaten die Zerstreuung in Volt pro 15 Minuten eingetragen. Schon unmittelbar nachdem die durch Kalilauge, Schwefelsäure und das Spannungsrohr geschickte Bodenluft eingetreten war (Stelle A der Kurve), stieg die Zerstreuung sehr stark an, so dass sie die Werte 855 für +, 847 für — nach ca. 3 Stunden, 953 bezw. 945 nach $5^1/_2$ Stunden erreichte. Die Höchstwerte, bis zu denen die Zerstreuung nach $5^1/_2$ Stunden anstieg, waren 954 für +,

947 für — (aus der nach den einzelnen Beobachtungsdaten konstruierten Kurve bei M entnommen). Von da an fielen die Werte in regelmässiger Weise ab, wie es auch in den von Ewers

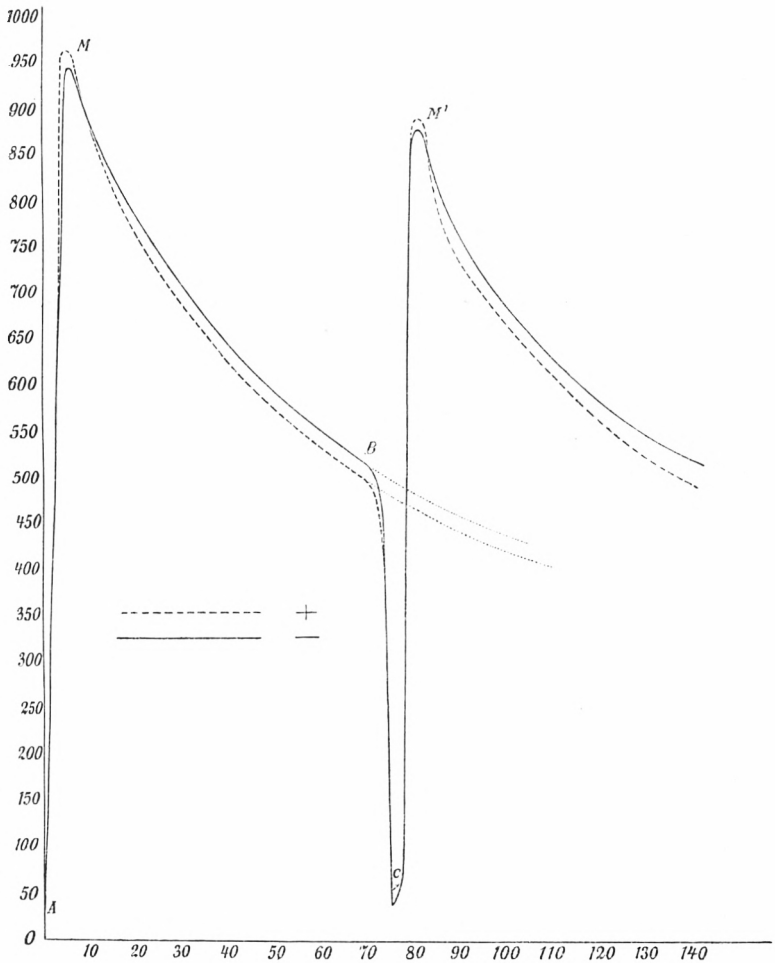

Fig. 1.

und mir in der oben erwähnten Arbeit mitgeteilten Kurven zum Ausdruck kommt.

Am gleichen Tage wurden nun unmittelbar nachdem die 75 Liter durch die Glocke geschickt worden waren, mit demselben Gasometer abermals 75 Liter Bodenluft entnommen, dann das Gasometer durch je eine Waschflasche mit Kalilauge und Schwefelsäure hindurch mit dem in der Dewarflasche befindlichen Kondensationsgefässe in Verbindung gesetzt, und die zweite Bodenluftprobe alsbald in dieses hinein verflüssigt. Diese Luftprobe wurde nun drei Tage lang verflüssigt erhalten, während gleichzeitig das Abklingen der Zerstreuung, welche die Vergleichsluftprobe unter der Glocke hervorrief, genau verfolgt wurde. Wenn auch während der Nacht etwas von dem Kondensat in das Gasometer, was dauernd angeschlossen blieb, zurückverdampfte, so konnte es doch leicht am anderen Morgen wieder in die Flüssigkeit zurückgeholt werden, dadurch, dass man mittels der Saugpumpe die Verdampfung der das Kondensat umgebenden Kühlluft etwas beschleunigte und damit die Temperatur erniedrigte. Jedenfalls wurde der wirksame Bestandteil in dem Kondensationsgefäss zum grössten Teile zurückgehalten, da die verflüssigte Luft aus diesem nie ganz entwich.

Nach drei Tagen (genauer 70 Stunden) war die Zerstreuung unter der Glocke bis auf 495 für +, 510 für — Ladungen zurückgegangen (Stelle B der Kurve Fig. 1). Jetzt wurde die Luft herausgesaugt und durch aus dem Freien angesaugte (und wie immer durch ein Wattefilter und eine Trockenflasche gegangene) Frischluft ersetzt, mit der dann noch 6 Stunden lang nachgespült wurde. Die Zerstreuung ging dadurch bis auf 49 bezw. 46 herab. Von nun an liess man die kondensierte Bodenluft durch die Glocke hindurch verdampfen, indem man das Kondensationsgefäss langsam aus der Dewarflasche heraushob (Stelle C). Schon während der Verdampfung stieg die Zerstreuung so, dass bereits nach $2^1/_2$ Stunden wieder 577 für + und 645 für — erreicht war. Man könnte meinen, dass die vorher vorhanden gewesene, stark ionisierte Luft die Gefässwände und alle von ihnen umschlossenen Gegenstände derart aktiviert hätte, dass infolge hiervon

die Zerstreuungen so schnell wieder in die Höhe gingen. Um zu entscheiden, ob der Einfluss der sicher vorhandenen Aktivierungen sich so weit erstrecken könne, wurde nach dieser Reihe in ganz gleicher Weise die Luft ausgesaugt, durch Frischluft ersetzt und mit dieser ebensolange nachgespült. Die Zerstreuungswerte erhielten sich dauernd auf der Höhe von 30 bis 36, etwa dem Betrage der Spontanionisierung. Die induzierte Radioaktivität der Wände klingt also zu rasch ab, um länger nachzuwirken. Dieses schnelle Steigen der Ionisierung schon während des Verdampfens musste also dem Umstande zugeschrieben werden, dass in diesem Falle ein Teil der Emanation bereits mit den Verdampfungsprodukten entweicht, noch ehe der letzte Tropfen Flüssigkeit verschwand, eine Erscheinung, die übrigens auch bei den im vorhergehenden Paragraphen erwähnten Bodenluftreihen schon hervortrat. Dass dies nicht im Widerspruche mit dem früher (etwa S. 136) Gesagten steht, erkennt man sofort, wenn man bedenkt, dass im vorliegenden Falle die Emanation ausserordentlich angereichert und, da das Kühlmittel das ganze Kondensationsgefäss umgab, an allen Teilen der Gefässwände niedergeschlagen war. Es konnte also beim allmählichen Herausziehen des Kondensationsgefässes aus der flüssigen Luft auch schon von den Wänden Emanation wieder verdampfen. Da, wie oben (S. 136) bereits hervorgehoben, der Kondensationspunkt der Emanation bedeutend höher als der der flüssigen Luft liegt, so können wir uns dieselbe in der Flüssigkeit gelöst oder auch als festen Körper in dieser suspendiert denken. In beiden Fällen kann sich beim Eindampfen der flüssigen Luft der Körper, der bei seinem Verdampfen in der Glockenluft die Ionisation hervorruft, an den Wänden absetzen und von hier aus z. T. bereits in den dampfförmigen Zustand übergehen, noch ehe das Lösungs- oder Suspensionsmittel ganz verdampft ist.

Nachdem alle Luft verdampft war, erreichte die Zerstreuung nach 5 Stunden ihre Höchstwerte M': 872 für + und 867 für —, also nur wenig niedrigere, als die Maximalzerstreuungen der Vergleichsluftprobe ganz am Anfange waren.

In dem verflüssigten Zustande hat die Bodenluft also ihre ionisierende Wirkung in hohem Grade konserviert.

Jedenfalls war die ionisierende Wirkung der verflüssigten Luft in den drei Tagen seit ihrer Entnahme aus dem Boden bei weitem nicht so weit herabgegangen, als die der Vergleichsluftprobe. Verlängert man die dieser letzteren entsprechende Kurve (in Fig. 1 punktiert), so würde sie nur 457 für +, 467 für — gegeben haben zu einer Zeit, wo die in der verflüssigten Luft angereicherte Emanation tatsächlich 872 bezw. 867, also beinahe doppelt so viel, ergab.

Würde es gelingen, die ganze Menge Bodenluft dauernd in kondensiertem Zustande zu erhalten, so dass nichts von derselben wieder verdampft, so würde sich auch ihre Emanation vollkommen erhalten lassen.

Dass in diesem Resultate kein Widerspruch mit den Ergebnissen von P. Curie, die er in der oben angeführten Arbeit in der Physikal. Zeitschrift mitteilt, liegt, wird w. u. erläutert.

12. Bei diesen mit Bodenluft angestellten Versuchsreihen, bei denen die Leitfähigkeit unter der Glocke besonders hohe Werte annahm, zeigte sich auch eine Erscheinung vollkommen deutlich, welche sonst auch wohl angedeutet war, aber nicht so klar hervortrat. Wie schon in der früheren Arbeit über die Bodenluftemanation hervorgehoben worden war und sich auch aus den hier mitgeteilten Zahlen ergibt, stellt sich unter der Glocke durchgängig eine ausgesprochene Unipolarität der Leitfähigkeit in dem Sinne her, dass die — Ladungen schneller als die + Ladungen des Zerstreuungskörpers ausgeglichen werden; die den ersteren entsprechenden Zerstreuungswerte sind in Fig. 1 durch eine ausgezogene Linie dargestellt, die den + Ladungen entsprechende durch eine gestrichelte Kurve. Da die + Ionen träger sind und den durch die Ladung des Zerstreuungskörpers bedingten Feldkräften langsamer folgen, als die — Ionen, so ist aus diesem Verhalten zu schliessen, dass ihre Zahl in der Glockenluft grösser als die

der — Gasionen ist. Wenn nun Emanation in so reichlichem Masse, wie sie in einer grösseren Anzahl Litern Bodenluft enthalten ist, in der Glocke plötzlich zur Wirkung gelangt und Zerstreuungen von der oben angegebenen Höhe hervorruft, so tritt in den ersten Stunden bis nach dem Ueberschreiten des Maximums eine Umkehr der geschilderten normalen Unipolarität ein, dergestalt dass + Ladungen schneller als — Ladungen zerstreut werden. Die Kurve der Zerstreuungswerte für die + Ladungen überschiesst bei dem steilen Ansteigen im Anfange gewissermassen die — Kurve, erreicht ein höher gelegenes Maximum als diese, kehrt dann aber etwa zu derselben Zeit wie diese um und fällt schneller ab; es tritt ein Durchschneiden der beiden Kurven ein, wie es auch in Fig. 1 angedeutet ist; dann erst lagern die Zerstreuungswerte für + dauernd unter denen für — Ladungen. Diese Umkehr, die anfangs Beobachtungsfehlern zugeschrieben wurde, hat sich stets gezeigt; insofern bedürfen auch die in unserer früheren Arbeit mitgeteilten Kurven in der Nähe ihrer Maxima einer entsprechenden Korrektur.[1])

Teilt man die Vorstellung, die Rutherford aus seinen Untersuchungen über die Emanationen abgeleitet hat, so kann man sich diese auffallende Erscheinung etwa wie folgt erklären: Die Emanation ist zunächst elektrisch völlig neutral, besteht aber aus Molekülen oder Molekülaggregaten, die von den raschest bewegten Molekülen eines zunächst ebenfalls neutralen Gases getroffen, Elektronen, d. h. sehr kleine, mit grosser Geschwindigkeit sich bewegende, negativ geladene Teilchen, Korpuskeln, abstossen; ein träger, positiv erscheinender Komplex bleibt zurück; wir haben zunächst gleich viel — und + Bestandteile im Gasraume. Wirkt ein Spannungsgefälle, etwa das von dem geladenen Zerstreuungskörper ausgehende, so tritt eine

[1]) Bei der sehr schnellen zeitlichen Aenderung der Zerstreuung am Anfange der Beobachtungsreihen könnte die Reihenfolge, in der das Verschwinden von + und — Ladungen gemessen wird, von Einfluss sein; um von diesem Einflusse frei zu sein, wurde am Beginn der Bodenluftreihen vielfach mit dieser Reihenfolge gewechselt.

Wanderung der elektrisch nicht mehr neutralen Bestandteile ein; die rascher beweglichen Elektronen neutralisieren die Ladung des im Inneren des Gases isoliert aufgestellten Zerstreuungskörpers viel rascher, wenn diese + ist, als es die ungleich schwerer beweglichen Restkörper mit dem — geladenen Zerstreuungskörper zu tun vermögen, daher die viel höheren Zerstreuungswerte für + Ladung am Anfange. Die aus den Emanationskernen hervorschiessenden Elektronen, die wie eine Becquerelstrahlung auf das umgebende Gas wirken müssen, rufen aber zweitens in diesem auch positive und negative gleich stark geladene Gasionen hervor. Hier bewegen sich die — Ionen wiederum schneller als die + Ionen. Kommen sie in die Nähe des zur Erde abgeleiteten Schutzdrahtnetzes oder der metallenen, gleichfalls geerdeten Bodenplatte (vergl. S. 141), so müssen daher in der Zeiteinheit viel mehr — Ionen als + Ionen ihre Ladungen an diese abgeben. Daher werden auch aus dem Gasinneren durch Diffusion allmählich viel mehr — Ionen auswandern; so stellt sich in der Zeit von einigen Stunden ein neuer Gleichgewichtszustand her, bei dem ein erheblicher Ueberschuss an + Ionen in dem Gase vorhanden ist. Nun werden — Ladungen schneller als + Ladungen zerstreut, ein Zustand der dann dauernd bestehen bleibt, ganz wie es die Beobachtungen zeigen.

13. Gegen die Bodenluftdoppelreihe in 11 könnte noch das Bedenken erhoben werden, dass die beiden dabei benutzten Luftproben nicht zu gleicher Zeit dem Boden entnommen wurden, sondern die eine am Vormittage, die andere am Nachmittage, wenn auch am gleichen Tage. In der Tat hängt die Wirksamkeit der Bodenluft sehr vom Wetter, namentlich vom Barometerstande ab, wie der Vergleich zahlreicher an derselben Stelle, aber zu verschiedenen Zeiten entnommener und dann in gleicher Weise geprüfter Proben zeigt.

Es scheint, dass die Bodenluft bei sinkendem Luftdrucke, namentlich aber bei gewissen Niederschlägen besonders reich an Emanation würde. Man kann dies einmal damit erklären, dass wenn der auf den Bodenschichten lastende Druck abnimmt, die

in den Erdkapillaren eingepressten Luftmassen aus grösseren Tiefen heraufkommen und dass andererseits die Niederschläge, Regen und Schnee, nach den oben S. 134 erwähnten Beobachtungen eine radioaktive Substanz mitbringen, die in der Bodenluft sehr wohl eine Emanation wachrufen kann. Selbst am gleichen Tage entnommene Proben sind daher in Bezug auf ihre Wirksamkeit möglicher Weise nicht direkt mit einander vergleichbar und es war erwünscht, das oben mitgeteilte Ergebnis an zwei Proben zu prüfen, welche zur selben Zeit dem Erdboden entnommen waren. Dazu wurde eine möglichst günstige Wetterlage ausgesucht. Als nach klarem Wetter das Barometer von Mittag an während des ganzen Nachmittags und im Verlaufe der Nacht stark gefallen war, wurden am Morgen eines regnerischen Tages mit dem 120 Liter-Gasometer 100 Liter Bodenluft entnommen; während der Entnahme sank der Luftdruck noch um 1 mm, Regen und Schnee fielen fast ununterbrochen. Von der Füllung wurde die eine Hälfte direkt unter die Glocke (unter Vorschalten der oben S. 150 genannten Absorptionsmittel) geschickt, in der Frischluft seit 13 Tagen gestanden und die maximale Zerstreuung von 31 für +, 35 für — im Mittel angenommen hatte. Die andere Hälfte wurde unmittelbar darauf verflüssigt.

Die Luftprobe war so reich an Emanation, dass die 50, in die Glocke eingelassenen Liter die Leitfähigkeit schon nach 5 Stunden auf 1185 für + und 1164 für — brachten, Maximalwerte, die mit zu den höchsten zählen, die ich auf dem genannten Wege beobachten konnte. Nach 6 Stunden war schon ein deutlicher Rückgang und die Ausbildung der normalen Unipolarität zu konstatieren. Dann sank die Zerstreuung in regelmässiger Weise und hatte nach 48 Stunden die Werte 756 für +, 764 für — erreicht. Nun wurde ausgepumpt, Frischluft eingelassen, gespült und die Zerstreuung bestimmt; es ergab sich 36 bezw. 24, ein Zeichen, dass die Wirkung der ersten Hälfte der Luftprobe vollkommen entfernt war. Hierauf wurde die zweite, seither verflüssigt erhaltene Hälfte in die Glocke gelassen; sofort stieg die Zerstreuung stark an, hatte

schon nach $3^1/_2$ Stunden die Schlusswerte des ersten Teiles der Reihe passiert und stieg nach ca. 6 Stunden bis zu Werten von 896 bezw. 892 an, welche um 212 bezw. 208 Volt höher liegen, als sie die erste Hälfte der Luftprobe zu derselben Zeit in der Glocke gezeigt haben würde. Also auch hier zeigte sich deutlich, dass die Emanation im flüssigen Zustand ihre Wirksamkeit nicht zerstreut, wie sie es tut, wenn sie einem Gase beigemischt wird.

Dass nicht die Höchstwerte des Anfangsstadiums der ersten Luftprobe erreicht werden, darf nicht verwundern. Denn tatsächlich ist die zweite Luftprobe nicht die ganze Zwischenzeit über im flüssigen Aggregatzustande. Einmal nimmt der Verflüssigungsprozess selbst mehrere Stunden, im vorliegenden Falle etwa 5 Stunden, in Anspruch; er kann nicht mehr beschleunigt werden, weil sonst die Absorptionsmittel, durch die die Luft vor ihrer Verflüssigung gesaugt wird, nicht genügend wirken würden. Ferner kann man den Kondensationsprozess nicht so genau dirigieren, dass sich die gesamte Flüssigkeitsmenge mehrere Tage lang in unveränderter Menge erhält. Würde man die Kühlluft fortwährend absaugen, so würde man Gefahr laufen, dass schliesslich auch das Gasometerwasser mit in das Kondensationsgefäss hineingezogen würde. Man muss es immer, namentlich während der Nacht zulassen, dass wieder ein Teil des Kondensates in das Gasometer zurückverdampft. So waren bei dem letzten Beispiele nach der einen Nacht 21 Liter, während der zweiten leider sogar 45 Liter wieder zurückverdampft; wenn dieselben am anderen Morgen auch sogleich wieder kondensiert wurden, und nach früher Gesagtem die Hauptwirkung im allerletzten Rest enthalten ist, so hatten sie doch zum Teil mehrere Stunden lang im vergasten Zustande gestanden.[1]) Da man die Abklingungskonstante für diesen Fall kennt (s. w. u.), so kann man wenigstens angenähert berechnen, wie viel die Emanation von ihrer Wirksam-

[1]) Eine automatisch wirkende Vorrichtung, die dieses verhindert, ist im Bau begriffen.

keit auf diese Weise verloren haben konnte. Addiert man die entsprechenden Werte zu den beobachteten, so gelangt man etwa zu denselben Zerstreuungswerten, welche die Vergleichsluftprobe am Anfange lieferte.

Die Tatsache, dass wir hier einen Zustand vor uns haben, bei dem eine radioaktivierende Wirkung gewissermassen latent bleibt und sich nicht mit der Zeit erschöpft, scheint mir nicht unwichtig für die Beantwortung der sehr schwierigen Frage zu sein, wie es möglich ist, dass gewisse radioaktive Ursachen ihre Wirksamkeit ungewöhnlich lange erhalten können. Es gibt eben molekulare Zustände, bei denen diese Körper nicht strahlen und folglich die ihnen innewohnende spezifische Energiequelle nicht erschöpfen. Erst wenn wir diese molekularen Verbände lösen, wird diese Energie in Form von Strahlung frei.

Zugleich wirft die Tatsache Licht auf das Wesen dessen, was man eine Emanation nennt. Im verflüssigten Zustande scheint sie nach aussen hin sich vollkommen neutral und indifferent zu verhalten; hier wirkt sie nicht und kann dadurch dauernd erhalten werden. Der gasförmige Zustand scheint die notwendige Bedingung dafür zu sein, sie in Wirksamkeit zu versetzen. Stellen wir uns die Emanation stofflich, d. h. als Molekül oder Molekülkomplex einer uns bekannten oder zur Zeit noch unbekannten Substanz vor, so können wir etwa daran denken, dass erst durch den Anprall der über die mittlere Geschwindigkeit bewegten Gasmoleküle jene Lockerung eintritt; die dabei frei werdende Strahlungsenergie erzeugt dann die positiven und negativen Bestandteile, welche das Gas nicht mehr elektrisch neutral, sondern in dem für seine Leitfähigkeit charakteristischen ionisierten Zustande erscheinen lässt.

Dass die Behauptung, die Emanation verliere bei der Temperatur der flüssigen Luft nichts von ihrer Wirksamkeit, nicht im Widerspruche mit den Ergebnissen der Curieschen Arbeit steht, erkennt man jetzt sofort, denn es handelt sich augenscheinlich um zwei ganz verschiedene Phänomene. Curie untersucht die Strahlung, welche durch die Wandungen von

Glaszylinderchen und die eines Aluminiumzylinders hindurch ein Gas elektrisch leitend macht, nachdem die Innenwandungen der Glaszylinder vorher durch die Nachbarschaft eines stark wirksamen aktiven Präparates induziert worden sind. Bei den hier beschriebenen Versuchen wird ein Bestandteil dem Gase einverleibt, welcher erst in diesem selbst zur Strahlungsquelle und damit zur ionenbildenden Ursache wird.

Wie weiter unten in § 16 näher erörtert werden wird, ist das durch unsere Kurven (vergl. auch die frühere Arbeit in der phys. Zeitschrift 4, 162, 1902) dargestellte Abklingen der Zerstreuungswerte in der Glockenluft bedingt einerseits durch die mit der Zeitkonstante λ (bei Curie $1/\Theta$) in ihrer Wirksamkeit sich vermindernde Kraft der Emanation, die im Gase formal demselben Gesetze folgt, wie es Curie aufstellt, andererseits aber auch durch die Zahl der in der Stunde stattfindenden, durch die Konstante α bedingten Wiedervereinigungen von bereits gebildeten Gasionen. Das letztere, die beobachteten Zerstreuungswerte vermindernde Glied, fällt in dem verflüssigten Zustande ganz weg oder ist hier jedenfalls nur sehr klein.

14. Wie schon oben S. 134 erwähnt, haben Sella und Pocchettino sowie J. J. Thomson fast gleichzeitig darauf aufmerksam gemacht, dass Luft, die mit Wasser intensiv geschüttelt wird, in sehr hohem Grade die Eigenschaft einer Emanation annimmt. Es war im Anschluss an die Bodenluftexperimente von Interesse zu prüfen, ob sich diese Emanation bei der Verflüssigung ähnlich verhalten würde, wie die dem Erdboden entstammende. J. J. Thomson erwähnt zwar, dass die Wasser-Luftemanation nicht durch ein Metallspiralrohr, das in Kohlensäureschnee gekühlt war, hindurchgehe, teilt aber nichts Näheres darüber mit, ob bei Temperaturerhöhung die Emanation wieder erschienen ist.

Dr. P. Ewers und ich haben die genannten Versuche in unserem Laboratorium aufgenommen, wobei wir uns sehr grosser Gefässe bedienen, um von dem Einflusse der Gefässwände nach Möglichkeit frei zu werden. Über unsere diesbezüglichen Ergebnisse werden wir gemeinsam a. a. O. eingehender berichten;

hier sei nur folgendes kurz erwähnt: Aus einem 600 Liter fassenden Kessel saugt ein kräftiges durch die Wasserleitung gespeistes Wassertrommelgebläse die Luft an und reisst sie durch ein $2^1/_2$ m hohes, 12 cm weites Rohr, in dem das verspritzende Wasser innig mit der Luft gemischt wird; unten trennen sich beide; das Wasser wird durch einen Heber kontinuierlich abgehoben und fliesst fort, die Luft tritt in den Kessel zurück, um bald aufs neue ihren Kreislauf zu beginnen.

Diese Luftzirkulation wird durch eine Körtingsche Wasserstrahlpumpe unterhalten, die bei 3 Atmosphären Wasserdruck und $8^3/_4$ Liter Wasserkonsum pro Minute $10^1/_2$ Liter Luft in der Minute stundenlang ununterbrochen fördert.

Zunächst musste durch längere Vorversuchsreihen festgestellt werden, ob nicht schon bei ruhendem Gebläse in der eingeschlossenen Luft durch in dem Material vorhandene, schwach aktivierende Substanzen eine über das normale Mass gesteigerte Ionisation wachgerufen würde. Dazu wurden von Zeit zu Zeit abgemessene Luftproben aus dem Kessel mittels eines Glockengasometers in die auch sonst benutzte Glasglocke eingesaugt und der Gang der Zerstreuung verfolgt; an Stelle der abgesaugten Luftmenge wurde Luft aus dem Freien in den Kessel gesaugt unter Passieren eines Wattestaubfilters. Die Zerstreuungen, die beim Lüften der Glocke bis auf ca. 14 herunter gingen, stiegen beim Einbringen von 30 Liter der nicht geschüttelten Luft meist nicht über 34. Dabei hatte die Luft auf dem Wege vom Kessel zur Glocke zu passieren: ein langes Bleirohr, ein Glaswollfilter, zwei Schwefelsäuretrockenflaschen, eine Spirale aus dünnwandigem Messingrohr und das Spannungsrohr, welches alle etwa in ihr vorhandenen Ionen in diesen und den folgenden Fällen aus ihr herausnahm. Wurde das Gebläse in Tätigkeit versetzt und die Luft $7^1/_2$ Stunden lang in Zirkulation erhalten, so stieg schon während des Einsaugens anderer 30 Liter die Zerstreuung in der Glocke stark an und hatte nach 4 Stunden die Werte 162 und 166 erreicht, um dann in der gewöhnlichen Weise abzuklingen.

9 Stunden nach dem Einbringen der Luft war die Zerstreuung 158 und 160, also um 144 bezw. 146 Volt höher als zu Anfang.

Nach 90 Stunden wurde diese Reihe abgebrochen und die Luft aus der Glocke ausgesaugt und dafür frische, direkt dem Freien entnommene, genau in gleicher Weise wie früher eingesaugt. Dass dabei die Zerstreuung schliesslich nur bis auf 27 bezw. 24 (und nicht auf 14 wie vorher, sank) lag daran, dass unmittelbar vorher noch sehr hohe Zerstreuung geherrscht hatte (90 bezw. 99) und die Gefässwände der Glocke daher noch schwach aktiv waren. Nun wurden abermals 30 Liter der wiederum $7^1/_2$ Stunden durch das Gebläse umgetriebenen Luft eingesaugt, dieses Mal aber war das Spiralrohr in ein mit flüssiger Luft gefülltes zylindrisches Dewargefäss eingetaucht. Unmittelbar nachdem die 30 Liter wieder eingesaugt waren, wurde die Schlauchverbindung hinter (von der Glocke aus gerechnet) dem Spiralrohr, das dauernd in der flüssigen Luft belassen wurde, durch einen Quetschhahn abgeschlossen so dass das Innere des Rohres mit dem Glockeninnern stets in Verbindung blieb, nach aussen hin aber abgeschlossen war. Nichtsdestoweniger machte sich die Emanation auch in der Folge nicht geltend. Nach drei Stunden, lange nachdem die 30 Liter sich unter der Glocke befanden, war die Zerstreuung noch immer 24 und 26: die Emanation wurde in dem stark gekühlten Rohre festgehalten, sie war hier kondensiert. Nach vier Stunden wurde 25 für +, 24 für — gemessen und so konnte das Einsetzen der aktivierenden Wirkung in der unter der Glocke befindlichen Luft so lange hintangehalten werden, als man die Spirale in der Kühlflüssigkeit beliess.

Nach 5 Stunden wurde die flüssige Luft entfernt: sofort stiegen die Zerstreuungen auf 114 bezw. 138 und hatten wiederum wie oben nach 4 Stunden die Maximalwerte von 160 und 170 erreicht. Die Emanation war also in der gekühlten Spirale angereichert und aufgespeichert worden und wurde beim Erhöhen der Temperatur sofort wieder in Freiheit

gesetzt. Dies beweist zugleich, dass die niedere Temperatur die Emanation nicht zerstört, sondern vielmehr wirklich nur zur Kondensation bringt, und dass die Verflüchtigungstemperatur auch der bei dem Schütteln von Luft mit Leitungswasser entstehenden Emanation höher als die Siedetemperatur der flüssigen Luft (— 191°) liegen muss, ähnlich wie es Rutherford-Soddy und P. Curie für die Emanationen der Thor- und Radiumverbindungen nachgewiesen haben. Da aber nach J. J. Thomson die Wasser-Luft-Emanation auch schon bei der Temperatur der Kohlensäure-Äther-Mischung (— 78°) völlig zurückgehalten wird, während nach der ausdrücklichen Versicherung der erstgenannten beiden Autoren die Thor- und Radium-Emanationen ein mit diesem Kältemittel gekühltes Kupferspiralrohr völlig unverändert passieren, so sind schon hierdurch wesentliche Unterschiede in der Natur dieser Emanationen angedeutet.

Die Anfangswerte der Zerstreuungen waren bei dieser Versuchsreihe, wie oben erwähnt, etwas höher als bei der vorigen, nämlich 24 und 26, d. h. die nach 9 Stunden erreichten Werte waren um 136 bezw. 144 Volt höher als die ohne die Emanation auftretenden. Dies sind fast die nämlichen Beträge, die bei der vorigen Reihe auftraten (vergl. S. 162), was noch deutlicher wird, wenn man gleich weit von den Anfangspunkten entfernt liegende spätere Zeitpunkte vergleicht; die Maximalwerte lassen sich nicht so genau wie die diesen letzteren entsprechenden Werte bestimmen.

15. Nachdem im vorstehenden gezeigt worden ist, wie man die verschiedenen in der Atmosphäre vorkommenden Emanationen anreichern und dadurch zu deutlicher ausgesprochener Wirkung bringen kann, erübrigt es noch, die Art kurz zu skizzieren, wie man das bei den einzelnen Beobachtungsreihen erhaltene Material dazu benutzen kann, um die Zahlenwerte der für die verschiedenen Fälle charakteristischen Konstanten daraus abzuleiten. Zunächst eine Bemerkung darüber, wie die Beobachtungen dargestellt wurden.

Wenn wie bei den letztbeschriebenen Versuchen die Verdampfungsprodukte der verflüssigten Luft von aussen her an-

gesaugt werden, braucht man die Glocke nicht abzuheben und kann mit dem Einsetzen der neuen Versuchsreihe so lange warten, bis das Maximum der spontanen Ionisierung der zum Spülen verwendeten Frischluft erreicht ist. Alsdann addieren sich die der eindringenden Emanation entsprechenden Werte direkt zu den ohne diese schliesslich zustande gekommenen Beträgen, etwa so, wie Fig. 2 zeigt, bei der angenommen ist, dass zur Zeit $t = 0$ die von allen freien Ionen unmittelbar vor dem Eintritt in den Versuchsraum befreite Emanation eingelassen wurde. Durch die Zerstreuungsmessungen wird

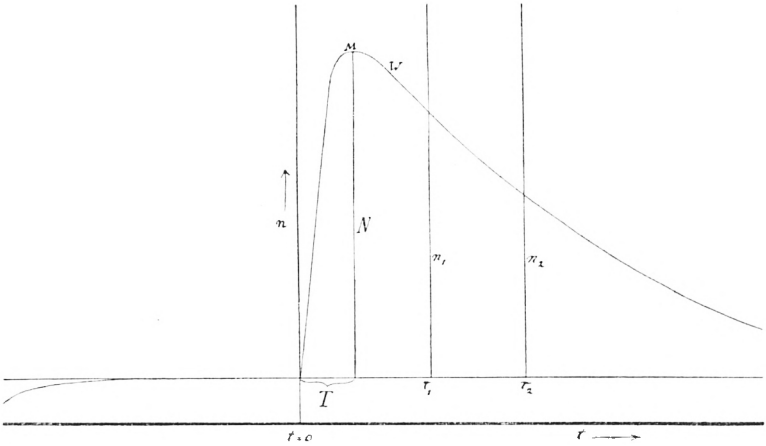

Fig. 2.

ein der augenblicklich vorhandenen freien Ionenzahl proportionaler Wert erhalten, wenn man mit so hohen Potentialen arbeitet, dass man annehmen kann, den Sättigungsstrom nahezu erreicht zu haben. Die zu den Zeiten als Abszissen aufgetragenen Zerstreuungswerte geben dann auch ein Bild von dem zeitlichen Verlaufe im Anwachsen und Abnehmen der Ionenzahl im Gase. Durch die die einzelnen Beobachtungswerte darstellenden Punkte wurden Kurven gelegt, welche für jedes Vorzeichen etwa die in Fig. 2 dargestellte Form besitzen. Dieselben steigen zunächst sehr steil, fast geradlinig

an, erreichen ein Maximum *M* und sinken allmählich wieder herab zu einem Kurvenstück, welches asymptotisch zu der als Nulllinie gewählten Parallelen zur Abszissenaxe zurückführt. Auf dem absteigenden Aste enthalten alle Kurven dicht hinter *M* einen Wendepunkt *W*. Aus den Kurven wurden die ausgeglichenen Werte für die Konstantenbestimmung entnommen.

16. Man kann die den zeitlichen Verlauf der ganzen Erscheinung darstellende Gleichung aufstellen, wenn man von dem Einflusse der Wände und damit dem der Diffusion der Ionen gegen diese absieht. Dass dies nicht ganz streng richtig ist, lehrt die in § 12 erwähnte Unipolarität der elektrischen Leitfähigkeit, welche die eingeschlossene Luft schon kurze Zeit nach dem Verdampfen der flüssigen Luft annimmt und die sich auch nach längerer Zeit nicht vollkommen ausgleicht. Der Sinn dieser Unipolarität ist, wie oben erwähnt, nach Ablauf des Anfangsstadiums der, dass — Ladungen schneller zerstreut werden als + Ladungen, dass also sehr bald ein Überschuss von + Ionen unter der Glocke vorhanden ist. Da die + Ionen unter der Wirkung eines bestimmten Potentialgefälles etwa im Verhältnisse von 4:5 langsamer wandern als die — Ionen, so muss das Überwiegen der Anzahl an + über die — Gasionen im Verhältnisse von 5:4 grösser als der Zahlenwert des Zerstreuungsverhältnisses selbst sein. Bildet man das entsprechende Verhältnis, so sieht man, dass die Unipolarität immerhin eine geringe ist, so dass man in erster Annäherung annehmen kann, dass an jeder Stelle des Gasraumes gleichviel positive und negative Ionen vorhanden sind. Dadurch, dass an den Wänden fortwährend Ionen ihre Ladungen abgeben, wird daselbst die Ionenkonzentration geringer und es tritt ein Nachwandern infolge des Konzentrationsgefälles ein, auf welches die Gesetze der freien Diffusion anwendbar sind. Sind die linearen Abmessungen der Versuchsräume aber, wie hier, gross, so treten diese Wandwirkungen mehr und mehr gegen die Vorgänge, die sich im Innern des Gasraumes abspielen, zurück. Wir können uns dann über diese letzteren, wie folgt, Rechenschaft geben:

Es sei n die Anzahl von Ionen der einen Art, welche zur Zeit t pro cbcm in der ionisierten Luft vorhanden sind. Diese Anzahl vermehrt sich fortwährend durch die Wirksamkeit der Emanation, die sich von dem Momente $t = 0$ an, in welchem sie in die Glocke eintritt, sehr rasch in dem ganzen Raume gleichmässig verbreitet haben wird. Von allen induzierenden Emanationen weiss man, dass ihre Wirkungen allmählich abklingen. Rutherford, der sich seither am meisten mit diesen Emanationen beschäftigt hat, stellte ein Abklingungsgesetz von der Form $e^{-\lambda t}$ als mit den Tatsachen am besten übereinstimmend fest, wo λ die für die einzelnen Emanationen verschiedener Herkunft charakteristische Abklingungskonstante ist. Ganz das gleiche Gesetz verifiziert P. Curie in der oben zitierten Arbeit durch seine Messungen; bei ihm ist $\lambda = \frac{1}{\Theta}$, wo Θ, die sog. Zeitkonstante des Vorganges in der Tat von der Dimension einer Zeit ist. Werden also in der ersten Sekunde bei frisch eingetretener Luftemanation Q Ionen in der Volumeneinheit erzeugt, so ist diese pro Zeit- und Raumeinheit produzierte Ionenmenge nach t Sekunden schon auf den Betrag $Q \cdot e^{-\lambda t}$ herabgesunken und nähert sich asymptotisch dem Nullwerte.

Ausser dieser ionenerzeugenden Ursache ist aber fortwährend eine andere tätig, welche auf eine fortwährende Verminderung der freien Ionen in dem abgeschlossenen Raume abzielt. Es ist dies die bei den Zusammenstössen eintretende Neutralisation durch Wiedervereinigung der durch die Emanation getrennten + und — Ladungen. J. J. Thomson war es, der zuerst die aus dieser Ursache in der Volumeneinheit pro Sekunde verschwindende Ionenzahl proportional dem Produkte der Ionenkonzentration setzte; im vorliegenden Falle, wo gleiche Anzahl + und — Ionen angenommen wird, ist diese Zahl also proportional dem Quadrate der zur Zeit t pro Volumeneinheit überhaupt vorhandenen Ionenzahl n. Dieser Ansatz hat sich seither in allen Fällen, in denen er quantitativer Prüfung zugänglich wurde, durchaus bewährt. Demnach ist die Änderung in der Ionenführung im cbcm pro Sekunde dn/dt zur Zeit t:

$$\frac{dn}{dt} = Q \cdot e^{-\lambda t} - a \cdot n^2, \qquad 1)$$

wo a der Koeffizient der Wiedervereinigung der vorhandenen Ionen ist.

Durch diese Gleichung ist die Ionenzahl n als Funktion der Zeit t vollkommen bestimmt, wenn die Werte der drei Konstanten Q, λ und a gegeben sind. Ausserdem ist ohne weiteres aus dem den Vorgang kennzeichnenden Kurvenverlaufe zu ersehen, dass für $t = 0$ auch $n = 0$ sein muss und dass n abermals den Nullwert für $t = \infty$ erreicht.

Da man den Zeitpunkt T, in welchem das Maximum der Leitfähigkeit eingetreten ist, aus der Kurve mit ziemlicher Sicherheit entnehmen kann und ebenso den ihr proportionalen Höchstwert der gleichzeitig im cbcm vorhandenen Ionenzahl N, so gewinnt man das Mittel, eine der drei Konstanten durch die beiden anderen auszudrücken. Am meisten empfiehlt sich die Elimination der Konstanten Q, enthält sie doch in der Tat ein willkürliches Element. Denn der Zahlenwert von Q hängt davon ab, wie viel wir von der Emanation in die Glocke bringen. Da für das Maximum $dn/dt = 0$ ist, so folgt

$$Q = a \frac{N^2}{e^{-\lambda T}}. \qquad 2)$$

Zählt man die Abszissen von der Maximumstelle aus und setzt $\tau = t - T$, so nimmt die Gleichung 1) die Gestalt an:

$$\frac{dn}{d\tau} = a\,(N^2 \cdot e^{-\lambda \tau} - n^2). \qquad 3)$$

Durch Integration der einzelnen Glieder erhält man für zwei beliebige Wertpaare der abhängigen und unabhängigen Variablen n_1, τ_1 und n_2, τ_2:

$$n_1 - n_2 = -\frac{a N^2}{\lambda}(e^{-\lambda \tau_1} - e^{-\lambda \tau_2}) - a \int_{\tau_2}^{\tau_1} n^2 \cdot d\tau. \qquad 4)$$

Zeichnet man also zu der gegebenen $n(t)$ Kurve eine zweite: $n^2(t)$, bei der alle Ordinaten quadriert sind, so kann man mittels Integraphen oder Planimeter für den zwischen den

Ordinaten n_1 und n_2 liegenden Flächenstreifen den numerischen Wert des Integrales rechts jederzeit ermitteln,[1]) und da man ebenso die Differenz $n_1 - n_2$ aus der Kurve selbst erhält, die Werte der Konstanten a und λ durch fortgesetzte Annäherungen berechnen, wenn man ein weiteres Wertepaar hinzuzieht.

Für die einzelne Emanation ist der Wert von λ charakteristisch, während die Grösse a, wie es scheint, eine Konstante für alle Beobachtungsreihen ist.[2]) Hat man dieses a also einmal hinreichend genau bestimmt, so kann man aus den mittels der Kurve leicht mit genügender Sicherheit zu bestimmenden Steigungsverhältnissen $dn/d\tau = \Phi$ die Abklingungskonstanten λ aus der Gleichung

$$\frac{1}{N^2}\left(\frac{\Phi}{a} + n^2\right) = \Gamma = e^{-\lambda\tau} \qquad 5)$$

zu

$$-\lambda = \frac{1}{\tau} \log \text{nat}\, \Gamma \qquad 6)$$

für eine grössere Anzahl von Kurvenpunkten (τ, n) bestimmen. Dieses λ ist dann für eine jede Reihe eine Konstante.

Aus λ und a erhält man schliesslich mittels der Gleichung 2) auch den Wert von Q.

Man kann die oben S. 167 aufgestellte Differentialgleichung 1) aber auch vollkommen integrieren, da sie sich auf eine Klasse von Riccatischen Gleichungen zurückführen lässt, welche E. von Lommel bereits vollkommen durch Besselsche Funktionen gelöst hat, worauf mich aufmerksam zu machen mein Kollege Herr Professor Dr. H. von Seeliger die Güte hatte.

Führt man an Stelle der Variablen t und n die neuen Variablen x und y durch die Substitution

---

[1]) Wählt man den Flächenstreifen nicht zu breit, so ist die obere Begrenzung des in Betracht kommenden Stückes der n^2-Kurve so nahe geradlinig, dass man den Streifen als Trapez behandeln kann.

[2]) Bemerkt sei hier, dass aus unseren Messungen ein anderer, in der Grössenordnung wesentlich höherer Wert, als der von Mc. Clung bei röntgenisierten Gasen gefundene, folgt.

$$\left.\begin{aligned} e^{-\lambda \cdot t} &= \beta x \\ \frac{1}{n} &= \gamma y \end{aligned}\right\} \qquad 7)$$

ein, so nimmt die Gleichung 1) die Gestalt an:

$$\frac{d y}{d x} = Q \frac{\beta \gamma}{\lambda} \cdot y^2 - \frac{a}{\gamma \lambda} \cdot \frac{1}{x}. \qquad 8)$$

Setzt man

$$y = \frac{1}{z} \cdot \frac{d z}{d x}, \qquad 9)$$

so geht 8) in die Gleichung

$$\frac{d^2 z}{d x^2} + \frac{z}{x} = 0 \qquad 10)$$

über, wenn man

$$\left.\begin{aligned} \beta &= -\frac{\lambda^2}{a Q} \\ \gamma &= \frac{a}{\lambda} \end{aligned}\right\} \qquad 11)$$

macht. Das vollständige Integral von 10) ist nach Lommel:[1])

$$z = \sqrt{x}\,[A\, J^1 (2 \sqrt{x}) + B\, Y^1 (2 \sqrt{x})], \qquad 12)$$

wo J^1 und Y^1 die Besselsche Funktion erster Ordnung erster und zweiter Art ist, und A und B Integrationskonstanten sind. Bildet man nach 9) y, so erhält man

$$y = \frac{1}{2 x} + \frac{\dfrac{d J^1 (2 \sqrt{x})}{d x} + C \dfrac{d Y^1 (2 \sqrt{x})}{d x}}{J^1 (2 \sqrt{x}) + C\, Y^1 (2 \sqrt{x})}, \qquad 13)$$

wenn man $C = B/A$ setzt; C ist die einzige willkürliche Integrationskonstante des Problems, die durch die Anfangs-Bedingung

$$t = 0 \qquad n = 0$$

$$x = \frac{1}{\beta} \qquad y = \infty \qquad \text{zu}$$

[1]) E. Lommel, Studien über die Besselschen Funktionen, Leipzig 1868, S. 114.

$$C = -\frac{J^1\left(2\sqrt{\frac{1}{\beta}}\right)}{Y^1\left(2\sqrt{\frac{1}{\beta}}\right)} \qquad 14)$$

bestimmt ist.

Es ist bekanntlich

$$\frac{d\,J^1(2\sqrt{x})}{d\,x} = \frac{1}{\sqrt{x}}\,J^0(2\sqrt{x}) - \frac{1}{2\,x}\,J^1(2\sqrt{x}).$$

Für die Besselschen Funktionen J^0 und J^1 hat Lommel Tafeln berechnet; wie aus 13) und 14) ersichtlich ist, muss man aber auch die Werte von Y kennen, und wenn auch für diese Funktionen genügend rasch konvergente Reihen existieren, so gestaltet sich doch die Diskussion auf diesem Wege etwas verwickelt.

Ich habe es daher vorgezogen die Konstanten auf dem Wege der oben bezeichneten Näherungsverfahren zu ermitteln. Eine Mitteilung des umfangreichen Materiales würde an dieser Stelle zu weit führen. Beispiele derartiger Konstantenberechnung werde ich bei Gelegenheit der Diskussion ähnlicher Abklingungskurven demnächst in Gemeinschaft mit Herrn Dr. P. Ewers, der mich auch schon bei diesen Untersuchungen aufs wirksamste unterstützt hat, an anderer Stelle mitteilen. Hier sollte zunächst nur das Verfahren mitgeteilt werden, durch welches mittels flüssiger Luft die Emanationen angereichert und in ihrer Wirksamkeit erhalten werden können. —

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 1903

Band/Volume: 1903

Autor(en)/Author(s): Ebert Hermann

Artikel/Article: Über die Möglichkeit radioaktivierende Emanationen in flüssiger Luft anzureichern 133-170