

Abhandlungen
der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Mathematisch-physikalische Klasse
XXV. Band, 1. Abhandlung

Radium, Thorium und Aktinium
in der Atmosphäre
und ihre Bedeutung für die atmosphärische Elektrizität

von

Karl Kurz

mit 4 Tafeln

Vorgelegt am 12. Juni 1909

München 1909

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

Abhandlungen
der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Mathematisch-physikalische Klasse
XXV. Band, I. Abhandlung

Radium, Thorium und Aktinium
in der Atmosphäre
und ihre Bedeutung für die atmosphärische Elektrizität

von

Karl Kutz

mit 4 Tafeln

Vorgelegt am 12. Juni 1909



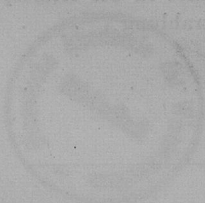
Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franzischen Verlags (A. Roth)

Plan.

	Seite
Einleitung: Ziel der Arbeit	5
Methode und Versuchsanordnung	7 12
Untersuchungen	16
I. Teil: Über die Natur der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre	16
A. Grundlagen einer Analyse der Stoffe	16
B. Die Analyse	19
1. Wirkungen einer Variation der Expositionszeit	19
a) Maximalaktivität und Maximalaktivierungsdauer	20
b) Ergebnisse sehr langer und sehr kurzer Expositionszeiten	22
c) Zerlegung der Abklingungskurven in drei Komponenten	24
α) Abtrennung der Thorkomponente	24
β) Abtrennung der Aktiniumkomponente	25
2. Wirkungen einer Variation der Expositionsspannung	27
a) auf die absolute Menge abgeschiedener Substanz	27
b) auf das Verhältnis Radium: Thorium: Aktinium	30
c) Das Verhältnis der spezifischen Geschwindigkeiten	33
d) Die Einwirkung des Erdfeldes	36
α) auf den ungeladenen Draht	37
β) auf den negativ geladenen Draht	37
γ) auf den positiv geladenen Draht	38
δ) auf die Leitfähigkeit in unmittelbarer Nähe des Drahtes	39
II. Teil: Über Wirkungsweise und Bedeutung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre	42
A. Reduktion der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl auf absolutes Maß	42
B. Die Abhängigkeit von meteorologischen Elementen	44
C. Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre	46
1. Wirkungsweise der radioaktiven Stoffe	46
2. Wirkung der radioaktiven Stoffe	48
a) Wirkung der Emanation in der Atmosphäre	48
b) der festen Zerfallsprodukte in der Atmosphäre	49
c) der durchdringenden Strahlung	52
d) der Bodenluft	53
Zusammenfassung	55

Plan

5	Einleitung: Ziel der Arbeit
7	Methodik und Versuchsanordnung
10	Untersuchungen
11	I. Teil: Über die Natur der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre
12	A. Grundriss einer Analyse der Stoffe
13	B. Die Analyse
14	1. Wirkung einer Variation der Expositionszeit
15	a) Messung der Aktivität und Messunsicherheitsberechnung
16	b) Ergebnisse der langer und sehr kurzer Expositionsdauern
17	c) Bestimmung der Abklingkonstanten in drei Komponenten
18	d) Abtrennung der Thoriumkomponente
19	e) Abtrennung der Radiumkomponente
20	2. Wirkung einer Variation der Expositionsgeschwindigkeit
21	a) mit der absoluten Messung abgeglichener Substanzen
22	b) mit der Vergleichsmethode: Radium: Thorium: Aktinium
23	c) Das Verhalten der spezifischen Geschwindigkeitskonstanten
24	d) Die Bestimmung des Zerfalls
25	e) mit den ungetriggerten Proben
26	f) auf den negativ geladenen Draht
27	g) auf den positiv geladenen Draht
28	h) auf die Leitfähigkeit in unmittelbarer Nähe des Drahtes
29	II. Teil: Über Wirkungsweise und Bedeutung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre
30	A. Bestimmung der Effekte der Aktivierungszahl auf absolutes Maß
31	B. Die Abhängigkeit von meteorologischen Elementen
32	C. Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre
33	1. Wirkungsweise der radioaktiven Stoffe
34	2. Wirkung der radioaktiven Stoffe
35	a) Wirkung der Ionisation in der Atmosphäre
36	b) der festen Aerosolgebilde in der Atmosphäre
37	c) der flüchtigen Substanzen
38	d) der Bodenschicht
39	Zusammenfassung



Einleitung.

Von den vier großen Familien radioaktiver Stoffe, Uran, Radium, Thorium, Aktinium, kommen für die Atmosphäre nur drei in Betracht: Radium, Thorium und Aktinium haben unter ihren Zerfallsprodukten ein gasförmiges Glied, eine Emanation. Für sie besteht also die Möglichkeit und damit in diesem Falle die Wahrscheinlichkeit, daß von den obersten Schichten der Erdrinde aus, in der sich die radioaktiven Stoffe in feinsten Verteilung vorfinden, die Atmosphäre mit den Emanationen und ihren Zerfallsprodukten durchsetzt wird. Mit der den Erdkapillaren entsteigenden Bodenluft, durch Diffusion, mit aufwärts gehenden Luftströmungen, also auf rein mechanischem Wege gelangt die gasförmige Emanation in die Höhe, zerfällt nach der ihr eigentümlichen Halbwertszeit und hinterläßt in der Atmosphäre die aus ihr sich entwickelnden festen radioaktiven Zerfallsprodukte.

Uran scheidet also bei einer Betrachtung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre deshalb aus, weil es keine Emanation entwickelt; andererseits läßt sich mit dem gleichen Grade von Wahrscheinlichkeit ohne weiteres behaupten, daß Glieder der Familien Radium, Thorium und Aktinium in gleicher Weise sich in der Atmosphäre aufhalten.

Der Nachweis dieser Anwesenheit wird sich für die drei um so leichter gestalten, je langlebiger die Emanation ist, je größer die Halbwertszeit, d. h. je länger die Zeit ist, in der die Hälfte der gerade vorhandenen Emanationsmenge durch radioaktiven Zerfall verschwindet. Die weitaus größte Halbwertszeit unter den drei Emanationen hat die des Radiums: 3,8 Tage. Hier besteht also die Möglichkeit, während verhältnismäßig langer Zeit eine etwa der Atmosphäre entzogene Emanationsmenge zu untersuchen. Die aus der Radiumemanation entstehenden Zerfallsprodukte lassen sich etwa vier Stunden lang beobachten, ehe sie praktisch vollständig verschwunden sind.

Die große Halbwertszeit der Radiumemanation können wir also als Ursache für eine verhältnismäßig starke Anreicherung in der Atmosphäre ansehen und auch als Grund für die zahlreichen Beobachtungen und Messungen, die an ihr bereits vorgenommen worden sind.

Weit ungünstiger liegen die Verhältnisse beim Thorium. Die Halbwertszeit seiner Emanation ist 53 Sekunden, also noch nicht $\frac{1}{6000}$ des Wertes bei Radiumemanation, d. h. die gleichzeitig mit der Radiumemanation in der Bodenluft dem Erdboden entsteigende Thoriumemanation zerfällt etwa 6000 mal schneller als die Radiumemanation. Obwohl bereits mehrere quantitative Messungen über den Emanationsgehalt der Atmosphäre zur Zeit vorliegen, ist trotzdem noch keine Trennung der Emanation in ihre etwaigen Komponenten durchgeführt worden. Der Grund liegt eben in der kurzen Halbwertszeit

der Thoriumemanation. — Für den Nachweis des Thoriums bzw. seiner Zerfallsprodukte in der Atmosphäre ist nun ein anderer Umstand günstig gewesen: die große Halbwertszeit eines der Zerfallsprodukte, des Thor A: 11 Stunden. Da, wie oben bemerkt, die Zerfallsprodukte der Radiumemanation nach vier Stunden praktisch verschwunden sind, so ergab sich aus der großen Halbwertszeit des Thor A eine Möglichkeit eines experimentellen Nachweises der Thoriumzerfallsprodukte in der Atmosphäre.

Am ungünstigsten liegt der Fall für das Aktinium. Die Halbwertszeit seiner Emanation ist 3,9 Sekunden, also etwa $\frac{1}{84000}$ von der der Radiumemanation. Aktiniumemanation, die dem Erdboden entweicht, zerfällt 84000 mal rascher als Radiumemanation. Dem Nachweis in der Atmosphäre kommt auch nicht der günstige Umstand wie beim Thorium zu Hilfe, eine große Halbwertszeit der Zerfallsprodukte der Emanation. Im Gegenteil, der Zerfall des radioaktiven Niederschlags von Aktinium zeigt weitgehende Übereinstimmung mit dem Zerfall des radioaktiven Niederschlags von Radium. Nach vier Stunden ist auch hier praktisch alle Substanz durch Zerfall verschwunden.

Die vorliegende Arbeit, deren experimenteller Teil bereits im Jahre 1906 im physikalischen Institut der Universität Gießen ausgeführt worden ist, wurde zu dem Zweck unternommen, nachzuweisen, daß die drei Substanzen, für die die Möglichkeit des Vorkommens in der Atmosphäre besteht, auch wirklich nachweisbar sind. Denn die Reihenfolge, in der geschichtlich die Auffindung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre erfolgte, ist tatsächlich in obigen Überlegungen begründet. Radium bzw. seine Zerfallsprodukte wurden zuerst in der Atmosphäre gefunden, dann folgte nach mehreren Jahren Thorium. Über das etwaige Vorhandensein von Aktinium wurden erst in jüngster Zeit, als der experimentelle Teil dieser Arbeit bereits abgeschlossen war, von Gockel¹⁾ und von Jaufmann²⁾ Andeutungen gemacht. Ich glaube mit vorliegender Arbeit nachweisen zu können, daß man den aus der Luft erhältlichen radioaktiven Stoff tatsächlich in drei Hauptkomponenten zerlegen und ihre Abstammung auf die drei in Betracht kommenden Familien Radium, Thorium und Aktinium zurückführen kann. Hier konnte, namentlich wegen des bereits besprochenen Verhaltens von Radium und Aktinium beim Zerfall des Niederschlags, nur eine weitgehende Variation der Versuchsbedingungen zum Ziele führen.

Eine weitere Aufgabe der Arbeit war der Versuch, die von Elster und Geitel als Maß für den Gehalt der Atmosphäre an radioaktiver Substanz eingeführte „Aktivierungszahl“³⁾ auf absolutes Maß zurückzuführen. Daran kränken bekanntlich alle nach der Elster-Geitelschen Methode ausgeführten Messungen, deren Resultate in „Aktivierungszahlen“ gegeben sind, daß man nicht weiß, was sie eigentlich in quantitativer Hinsicht bedeuten, in welchem Zusammenhang sie mit dem tatsächlichen Gehalt der Luft an radioaktiver Substanz stehen. Der leitende Wunsch in dieser Arbeit war daher, die zahlreichen bereits an vielen Orten der Erde ausgeführten Messungen nachträglich auf absolutes Maß reduzieren zu können. Wir haben in der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl einen analogen Fall zum Elster-Geitelschen Zerstreuungsapparat. Zur Erschließung und Ein-

¹⁾ A. Gockel, Phys. Zs. 8, 701, 1907.

²⁾ J. Jaufmann, Untersuchungen über den radioaktiven und elektrischen Zustand der Atmosphäre. Dissertation, München 1908, S. 21.

³⁾ Elster und Geitel, Phys. Zs. 4, 526, 1903.

führung in bis dahin gänzlich unbekannte Gebiete haben Zerstreuungsapparat und Aktivierungszahl unschätzbare Dienste geleistet. Als man aber dann nach der Orientierung im vorliegenden Gebiete zu quantitativen Messungen übergang, zeigte sich die Unmöglichkeit, die zahlreichen bereits ausgeführten Messungen streng richtig zu deuten. Einen Versuch einer quantitativen Deutung der Aktivierungszahl und damit bis zu einem gewissen Grad aller in Aktivierungszahlen gegebenen Messungen, enthält die vorliegende Arbeit.

Ferner ist hier der Versuch gemacht worden, zu zeigen, daß es nicht angängig ist, in der hie und da gebräuchlichen Weise das Verhältnis der Aktivitäten der in der Atmosphäre vorhandenen Stoffe anzugeben. Es wird gezeigt, wie weit dies Verhältnis unter Umständen lediglich eine Funktion der jeweiligen Versuchsanordnung ist, und wie sich dies Verhältnis gestaltet bei einer speziellen Versuchsanordnung.

Im Anschluß hieran soll dargelegt werden, wie weit bei allen Aktivierungen von Drähten in der Atmosphäre das Resultat abhängig ist von dem natürlichen elektrischen Felde der Erde, in dem die Versuche ausgeführt werden. Hier soll namentlich dann auch die Frage nach der Aktivierung von Drähten bei positiver Spannung von diesem Gesichtspunkte aus beleuchtet werden.

Schließlich sind in einem II. Teil die von mir gefundenen Resultate im Zusammenhang mit den von anderen Seiten her vorliegenden Ergebnissen entsprechender Untersuchungen auf das Gebiet der Lufterlektrizität angewandt worden zur Beantwortung einer der Kernfragen der gesamten Lufterlektrizität: Welchen Beitrag zu der Aufrechterhaltung des Elektrizitätshaushaltes der Atmosphäre vermögen die radioaktiven Stoffe zu liefern?

Methode.

Der erste Nachweis fester radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre und im Anschluß daran weitaus die meisten auf diesem Gebiete gemachten Untersuchungen gründen sich auf ein bekanntes Experiment Rutherfords: Setzt man einen Metalldraht in einem geschlossenen Gefäße der Einwirkung der Thoremation aus, so bedeckt sich nach und nach die Oberfläche des Drahtes mit den Zerfallsprodukten der Emanation, mit Thor *A, B, C*.

Dies Experiment auf die freie Atmosphäre übertragen,¹⁾ liefert radioaktive Stoffe, die einem Luftzylinder von um so größerem Durchmesser entzogen sind, je höher man die an den Draht anzulegende negative Spannung wählt. Der in dieser Weise aktivierte Draht wird zur Untersuchung in den Zerstreuungsraum eines Elektrometers gebracht. Man beobachtet nun den Elektrizitätsverlust des geladenen Systems infolge der durch die radioaktiven Stoffe unterhaltenen Ionisierung der Luft. „Aktivierungszahl“ nannten Elster und Geitel die Voltzahl, um die die Spannung des bekannten Elster-Geitelschen Zerstreuungsapparates während einer Stunde fiel durch Einbringen von 1 m des in Luft bei ca. —2000 Volt aktivierten Drahtes.

Da die Menge der auf einem Draht abgelagerten Substanz abhängig ist von der Höhe der an den Draht angelegten Spannung, so war zu schließen, daß den sich ab-

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. Zs. 4, 526, 1903; 3, 305, 1902; 4, 96, 1902.

lagernden radioaktiven Partikeln im elektrischen Felde eine bestimmte spezifische Geschwindigkeit zukommt. Dann aber kann eine in obiger Weise ausgeführte Untersuchung kein quantitatives Resultat liefern: Man weiß nicht, welchem Luftvolumen man die schließlich auf dem Draht vorhandene Menge radioaktiver Substanz entzogen hat.¹⁾ Quantitative Messungen des Gehaltes der Luft an festen radioaktiven Stoffen wurden daher nach einer Aspirationsmethode unternommen:²⁾ Man saugt ein abgemessenes Luftvolumen durch einen Röhrenkondensator, in dem Sättigungsstrom herrscht für die radioaktiven Stoffe. Die Niederschläge auf der negativen Elektrode werden dann in geeigneter Weise gemessen.

In vorliegender Arbeit sind beide Methoden zur Gewinnung radioaktiver Stoffe aus der Atmosphäre in Anwendung gekommen. Zur Analyse der Art der Stoffe war es nötig, in möglichst kurzer Zeit möglichst große Mengen solcher Substanz erhalten zu können. Dafür erwies sich das Ausspannen eines langen dünnen Drahtes bei Anwendung hoher negativer Potentiale am geeignetsten. Gründe, die im Wesen der zu untersuchenden Momente lagen, vor allem in der Frage nach der Bedeutung des Erdfeldes für die gesamten Erscheinungen, bedingten es, daß die Drähte nicht, wie bisher üblich, horizontal, sondern in einer Länge von über 20 m vertikal ausgespannt wurden. — Es wurden am gleichen Beobachtungsort nach einer Aspirationsmethode quantitative Messungen des Gehaltes der Atmosphäre an festen radioaktiven Stoffen ausgeführt. Diese sollten dann die eingangs angedeutete Reduktion der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl auf absolutes Maß ermöglichen. Denn die bei der Aktivierung von Drähten in der Atmosphäre erhaltenen Resultate konnten in „Aktivierungszahlen“ angegeben werden. —

Die Variationsmöglichkeiten, die die Methode der Untersuchung der auf einem Draht angesammelten radioaktiven Substanzen gestatten muß, wenn sie eine Analyse dieser Stoffe und die Beantwortung der weiteren hier gestellten Fragen erlauben soll, ergaben sich aus einer Betrachtung der bekannten Formeln über die Abklingung radioaktiver Niederschläge:³⁾

Aus der Emanation einer radioaktiven Substanz sollen der Reihe nach drei verschiedene Stoffe A' , B' , C' entstehen, so daß beim Zerfall der Emanation der Körper A' , aus diesem der Körper B' und aus diesem endlich C' gebildet wird.⁴⁾ Die Stoffe A' , B' , C' seien charakterisiert durch die Radioaktivitätskonstanten λ_1' , λ_2' , λ_3' , gegeben in sec^{-1} , und wir wollen weiterhin die Annahme machen, daß sich auf dem in der Emanation ausgespannten Draht nur der Stoff A' niederschlägt; die Stoffe B' und C' , die wir bei einer Untersuchung auf dem Draht ebenfalls vorfinden, seien also erst sekundär aus dem primär niedergeschlagenen A' entstanden. Ob man diese Annahme wirklich machen kann, muß

¹⁾ H. Gerdien, Phys. Zs. 6, 465, 1905.

²⁾ H. Gerdien, a. a. O.; Abhandlungen der K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Neue Folge 5, Nr. 5, 1907. K. W. F. Kohlrausch, Wien. Ber. 115, 2a, 1263, 1906. K. Kurz, Die Beeinflussung luftelektrischer Messungen durch die festen radioaktiven Stoffe der Atmosphäre. Dissertation, Gießen 1907, S. 62. Phys. Zs. 9, 177—184, 1908.

³⁾ Unter der Bezeichnung „radioaktive Niederschläge“ ist also im folgenden immer die ganze Reihe fester Zerfallsprodukte der Emanation zu verstehen, die sich auf einem der Emanation ausgesetzten Draht niederschlagen.

⁴⁾ Auf die speziellen Verhältnisse in der Atmosphäre übertragen, wäre dies der Fall des Radiums mit Emanation, $Ra A$, $Ra B$, $Ra C$, da die weiteren Glieder der Radiumfamilie bis $Ra F$ bzw. $Ra G$ für unsere Zwecke nicht in Betracht kommen ihres langsamen Zerfalls wegen und wegen der Art der von ihnen ausgesandten Strahlen.

natürlich besonders geprüft werden; der Beweis, daß dies tatsächlich erlaubt ist, wird später, S. 24, erbracht.

Was wir im Elektrometer messen können, das sind jeweilig die Bruchteile der Stoffe A' , B' , C' , die gerade im Zerfall begriffen sind. Bezeichnen wir diese Mengen mit $\mathfrak{A}'$, $\mathfrak{B}'$, $\mathfrak{C}'$, ist der Draht während der Zeit Θ (in sec.) aktiviert worden, und ist seit Schluß der Aktivierung die Zeit t (in sec.) verstrichen, so ist¹⁾

$$(1) \quad \begin{cases} \mathfrak{A}' = q' e^{-\lambda_1' t} (1 - e^{-\lambda_1' \Theta}) \\ \mathfrak{B}' = q' \left[\frac{\lambda_2'}{\lambda_2' - \lambda_1'} \cdot e^{-\lambda_1' t} (1 - e^{-\lambda_1' \Theta}) + \frac{\lambda_1'}{\lambda_1' - \lambda_2'} \cdot e^{-\lambda_2' t} (1 - e^{-\lambda_2' \Theta}) \right] \\ \mathfrak{C}' = q' \left[\frac{\lambda_2' \lambda_3'}{(\lambda_1' - \lambda_2')(\lambda_1' - \lambda_3')} \cdot e^{-\lambda_1' t} (1 - e^{-\lambda_1' \Theta}) + \frac{\lambda_3' \lambda_1'}{(\lambda_2' - \lambda_3')(\lambda_2' - \lambda_1')} \cdot e^{-\lambda_2' t} (1 - e^{-\lambda_2' \Theta}) \right. \\ \quad \left. + \frac{\lambda_1' \lambda_2'}{(\lambda_3' - \lambda_1')(\lambda_3' - \lambda_2')} \cdot e^{-\lambda_3' t} (1 - e^{-\lambda_3' \Theta}) \right]. \end{cases}$$

„ q' bedeutet die Anzahl der zerfallenden Atome jedes Radioelementes, die sich im Zustand des radioaktiven Gleichgewichtes auf dem aktivierten Körper befinden; im Zustand des radioaktiven Gleichgewichtes (d. h. für $\Theta = \infty$ und $t = 0$) muß $\mathfrak{A}' = \mathfrak{B}' = \mathfrak{C}' = q'$ werden.“²⁾ Unterscheiden sich die drei Stoffe A' , B' , C' in der Art und dem Ionisierungsvermögen der von ihnen ausgesandten Strahlen, so haben wir die Ionisation in dem betreffenden Zerstreuungsgefäß zu setzen

$$(2) \quad I' = k_1' \mathfrak{A}' + k_2' \mathfrak{B}' + k_3' \mathfrak{C}';$$

„ k_1' , k_2' , k_3' sind Proportionalitätsfaktoren, mit denen die Stärke des radioaktiven Prozesses (d. h. die Zahl der zerfallenden Atome) zu multiplizieren ist, um die radioaktive Wirkung (Ionisation im betreffenden Zerstreuungsgefäß) zu erhalten.“³⁾

Wir nehmen nun eine zweite und eine dritte Emanationsart an, deren Zerfallsprodukte sich gleichzeitig mit den eben besprochenen Stoffen A' , B' , C' auf dem aktivierten Draht vorfinden sollen. Machen wir die Annahme, daß entweder die Reihe in beiden Fällen mit dem Glied B aufhört, oder daß ein etwa entstehendes Glied C sehr rasch zerfällt und unter Aussendung von den gleichen Strahlen wie Glied B , so erhalten wir entsprechend den oben eingeführten Bezeichnungen die weiteren Gleichungen:

$$(3) \quad \begin{cases} \mathfrak{A}'' = q'' e^{-\lambda_1'' t} (1 - e^{-\lambda_1'' \Theta}) \\ \mathfrak{B}'' = q'' \left[\frac{\lambda_2''}{\lambda_2'' - \lambda_1''} e^{-\lambda_1'' t} (1 - e^{-\lambda_1'' \Theta}) + \frac{\lambda_1''}{\lambda_1'' - \lambda_2''} e^{-\lambda_2'' t} (1 - e^{-\lambda_2'' \Theta}) \right] \end{cases}$$

$$(4) \quad I'' = k_1'' \mathfrak{A}'' + k_2'' \mathfrak{B}''$$

und die entsprechenden für

$$(5) \quad \mathfrak{A}''', \mathfrak{B}''' \text{ und}$$

¹⁾ Vgl. H. W. Schmidt, Ann. d. Phys. 21 (4), 609–664, 1906.

²⁾ H. W. Schmidt, a. a. O., S. 627.

³⁾ H. W. Schmidt, a. a. O., S. 627.

(6) I''' , wenn λ_1'' , λ_2'' , λ_1''' , λ_2''' die in Betracht kommenden Radioaktivitätskonstanten sind.

Damit aber haben wir die Grundgleichungen für den Zerfall radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre, wenn wir von der Annahme ausgehen, daß wir die Zerfallsprodukte der drei radioaktiven Stoffe, die eine Emanation zu bilden vermögen, in der Atmosphäre auch wirklich erwarten dürfen. Denn für Radium kommen als wirksame Ionisatoren in der Luft neben der Emanation die drei ersten Glieder der Niederschlagsreihe in Betracht, die sogenannten „Glieder mit raschem Zerfall“. Von Thorium und Aktinium sind bisher überhaupt nur die Glieder bis zum Thorium C bzw. Aktinium C bekannt; wie wir später sehen werden, liegen hier zudem die Verhältnisse tatsächlich so, daß wir bei unseren Rechnungen mit dem Glied Thorium B bzw. Aktinium B abschließen, also die Formeln (3) bis (6) verwenden dürfen.

Was besagen nun diese Formeln für die hier anzuwendende Methode?

1. Die Kurve, die man erhält, wenn man die Änderung der Glieder A, B, C mit der Beobachtungszeit t verfolgt von $t = 0$ bis $t = \infty$ bzw. bis zum völligen Verschwinden, ist abhängig von der Expositionszeit Θ , der Zeit, während der der zu aktivierende Körper der Einwirkung der Emanation ausgesetzt war. Der Anfangswert, den man erhält, wenn man die Beobachtungszeit $t = 0$ setzt, kann einen Maximalwert erreichen bei einem bestimmten Wert von Θ , der sich aus den in Betracht kommenden Größen λ in einfacher Weise berechnet. Dieser Wert von Θ ist also für die einzelnen hier in Betracht kommenden Substanzen verschieden, je nach dem zugehörigen λ . Da wir es schließlich nach unserer Annahme mit einer Kombination von drei Hauptkurven zu tun haben, so liegt für eine Analyse dieser Kurven der einfachste Fall dann vor, wenn auch für die am langsamsten sich ansammelnde Substanz — das ist hier zugleich die am langsamsten zerfallende — der Maximalwert von Θ eingehalten worden ist. In allen Fällen mit kürzerem Θ ist eine Kurvenform nur dann eindeutig gekennzeichnet, wenn auch das zugehörige Θ , die Aktivierungsdauer, angegeben ist. Man kann also verschiedene Gesamtkurvenformen erhalten je nach der Wahl von Θ . Da es sich hier nun um eine Analyse der Kurven zur Klärlegung ihrer etwaigen Komponenten handelt, so ergibt sich hieraus die Forderung einer Variation der Expositionsdauer Θ zum Zwecke einer Variation der erhaltbaren Kurvenformen. — Dieselbe Forderung ergibt sich, wenn die Berechtigung der Annahmen geprüft werden soll, auf der die Formeln (1) bis (6) aufgebaut sind: Es soll nur das erste Glied, A, primär auf dem zu aktivierenden Körper niedergeschlagen werden, die übrigen sollen sekundär aus A entstehen. Das wird sich zeigen lassen durch Heruntergehen auf möglichst kleine Θ . — Eine Variation der Expositionsdauer fordert drittens die Frage: Kommt keine radioaktive Substanz in meßbarer Menge in der Atmosphäre vor, die noch langsamer abklingt, als die bisher bekannten und hier in Betracht kommenden Stoffe? Das enthält die Forderung, noch über die aus den bekannten λ sich ergebende Maximalaktivierungsdauer hinauszugehen. — Hier ist daher die Expositionszeit variiert worden von vier Sekunden an bis 209 Stunden.

2. Die zu analysierende, aus obigen Formeln errechenbare Kurve kommt zustande durch Abklingung einer Kombination von mehreren radioaktiven Stoffen, die sich infolge der Wirkung eines elektrischen Feldes nach dem zu aktivierenden Körper hinbewegt haben.

Den einzelnen Substanzen muß also eine spezifische Geschwindigkeit im elektrischen Felde zukommen. Ist diese Geschwindigkeit für die einzelnen Stoffe gleich, so hätte dieser Umstand keine Wirkung auf die Kurvenform. Die Größe der Geschwindigkeit, die durch das Feld den Stoffen erteilt wird, hätte nur Bedeutung für die Menge der abgelagerten Substanzen, nicht dagegen für das Verhältnis der einzelnen Komponenten zueinander. Ist diese Geschwindigkeit aber nicht gleich für die drei Substanzen — und das wird man von vornherein als wahrscheinlich annehmen können — so ist also die Kurvenform auch abhängig von der an den zu aktivierenden Körper angelegten Spannung. Es wird sich zeigen lassen, auch experimentell, daß ein um so stärkeres Hervortreten der leichter beweglichen Partikel eintritt, je höher die Spannung gewählt wird. Das Mengenverhältnis der auf einem Draht angesammelten radioaktiven Substanzen verschiedenen Ursprungs und damit die Form der zu erhaltenden Abklingungskurve ist also bis zu einem gewissen Grad eine Funktion der angelegten Spannung, der „Expositionsspannung“. Daraus ergibt sich für die hier angestrebten Zwecke die Forderung einer Variation der Expositionsspannung.

3. Weiter ergibt sich hieraus die Forderung, den zu aktivierenden Draht nicht, wie bisher üblich, horizontal, sondern vertikal auszuspannen. In dem elektrischen Felde der Erde repräsentiert dann der Draht von unten nach oben gewissermaßen eine kontinuierliche Variation eines elektrischen Feldes, indem, wie gezeigt werden wird, dieser Leiter im Erdfeld eine Deformation der Potentialflächen herbeiführt, die es bewirkt, daß längs des Drahtes von unten nach oben eine Steigerung des Potentialgefälles eintritt. Und eben das Potentialgefälle beeinflusst wegen der verschiedenen spezifischen Geschwindigkeiten der radioaktiven Substanzen das Verhältnis der abgelagerten Mengen. — Da der Draht eine Länge von über 20 m hatte, so konnte er auch in verschiedene Teile zerlegt, und diese Teile konnten einzeln untersucht werden. Das ermöglichte zugleich, ein Bild über etwaige Verschiedenheiten in dem Gehalte an radioaktiven Substanzen in den untersten Schichten der Atmosphäre zu geben.

4. Die Formeln (2), (4), (6) sagen, daß die Ionisation im Zerstreuungsgefäß — und das ist das, was wir messen, was uns die Kurvenform liefert — sich nicht einfach durch Addition der Glieder $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, der Menge der jeweils zerfallenden Atome der verschiedenen Substanzen, ergibt; es ist vielmehr z. B.

$$I = k_1 \mathfrak{A} + k_2 \mathfrak{B} + k_3 \mathfrak{C}.$$

Die einzelnen Substanzen senden verschiedene Arten von Strahlen aus, und selbst gleichartige Strahlen, wie z. B. die α -Strahlen von *Ra A* und *Ra C* unterscheiden sich durch ihre Reichweite. Für ein bestimmtes Zerstreuungsgefäß von bestimmter Höhe und bestimmtem Querschnitt sind also zunächst die Größen k festzustellen, wenn man von der Ionisation, d. h. der Kurvenform, auf die Größen $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, die Zahl der gerade zerfallenden, damit auf die Zahl der überhaupt vorhandenen Atome und damit endlich auf das Verhältnis der einzelnen Größen zueinander schließen will. Mit anderen Worten: die Form der Abklingungskurve und damit unter Umständen das Ergebnis der Analyse ist abhängig von Form und Größe des Zerstreuungsgefäßes, in dem die Abklingung verfolgt wird. Daraus ergibt sich also die Forderung einer experimentellen Bestimmung der Größen k für die jeweilige Versuchsanordnung.¹⁾

¹⁾ Vgl. H. W. Schmidt, a. a. O., S. 627.

Über die bei den quantitativen Messungen des Gehaltes der Atmosphäre an festen radioaktiven Stoffen angewandte Methode vgl. K. Kurz, Phys. Zs. 9, 177—184, 1908. Diese Messungen mußten auch zum Zweck einer Reduktion der „Aktivierungszahl“ auf absolutes Maß vorgenommen werden.

Wegen der Schwankungen, denen die radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre durch meteorologische Faktoren unterworfen sind, ist es schwer, die an verschiedenen Tagen bei verschiedenen Bedingungen, Variation der Expositionszeit, Variation der Expositionsspannung, erhaltenen Resultate direkt miteinander zu vergleichen. Es wurden daher, um diesen Vergleich zu ermöglichen, immer gleichzeitig zwei Drähte exponiert. An dem einen, dem Versuchsdraht, wurden die Variationen vorgenommen; der zweite Draht, der Normaldraht oder Kontrolldraht, wurde bei allen Versuchen bei derselben Spannung dieselbe Zeit aktiviert, konnte also ein relatives Maß für die augenblicklich vorhandene Menge radioaktiver Substanz in der Atmosphäre geben.

Versuchsanordnung.

Ein dünner Kupferdraht von 23,55 m Länge und 0,2 mm Durchmesser in freier Luft vertikal ausgespannt und isoliert befestigt, wird eine bestimmte Zeit auf bestimmtem Potential gehalten, dann rasch auf ein Gestell gewickelt, das als Einsatz in den Zerstreungsraum eines Blattelektrometers gearbeitet ist. Das Aluminiumblättchen beginnt unter der ionisierenden Wirkung der radioaktiven Stoffe im Zerstreungsraum zu wandern. Dies Wandern wird beobachtet.

Die Gesamtanordnung wird am einfachsten klar, wenn wir einen Versuch in seinem ganzen Verlauf verfolgen und dabei die in Betracht kommenden Apparate an der betreffenden Stelle besprechen.

a) Ausspannen des Drahtes: Es werden immer gleichzeitig zwei Drähte ausgespannt, ein Untersuchungsdraht und ein Kontrolldraht. An der Brüstung des über 20 m hohen Institutsturmes der Universität Gießen wurden drei starke Bambusrohre von je 7 m Länge in je $2\frac{1}{2}$ m Abstand von einander in horizontaler Lage befestigt. Sie ragen ca. 6 m ins Freie, so daß die daran zu befestigenden Drähte auch bei windigem Wetter nicht an die Turmwand anschlagen können, trotzdem der Unterbau des Turmes etwas mehr hervortritt. Die beiden Drähte sollen an den äußeren Stangen befestigt werden, sind also ausgespannt 5 m voneinander entfernt.¹⁾ Von jeder äußeren Stange geht über Rollen gleitend ein Schnurlauf ohne Ende nach der Mittelstange und von da zur Tiefe bis auf den Erdboden. Soll ein Draht ausgespannt werden, so wird an der Schnur ohne Ende ein Scheringscher Isolierhaken befestigt und an diesem der abgemessene Draht. Haken und Draht werden in die Höhe gezogen; der Draht wird durch ein unten angehängtes geringes Gewicht straff gehalten. Die ganze Einrichtung kann so von unten bedient

¹⁾ Wie aus einer Beobachtung von Eve (A. S. Eve, Phyl. Mag. 10, 98, 1905) hervorgeht, stören sich die beiden Drähte bei dieser Entfernung und der hier angewandten Spannung nicht mehr in ihrem Bereiche.

werden, und Ausspannen und Einholen des Drahtes läßt sich in außerordentlich kurzer Zeit bewerkstelligen.

b) Anlegen der Spannung: Vom unteren Ende des Drahtes geht ein Verbindungsstück zur Spannungsquelle in dem im Erdgeschoß des Turmes gelegenen Beobachtungszimmer. Eine isolierte Durchführung durch den Fensterrahmen mittels eines Elster-Geitel-schen Isolierhakens genügt also.¹⁾ Als Spannungsquelle dient bis zu 500 Volt eine sogenannte Wasserbatterie, deren Spannung ständig mit Hilfe eines Aluminiumblattelektrometers kontrolliert wird. Die Spannungen über 500 bis 4600 Volt liefert eine Whimshurstmaschine, die durch einen Elektromotor getrieben wird. Die Maschine muß viele Stunden lang konstante Spannung geben. Zu diesem Zwecke ist sie vollständig in einen Kasten eingebaut, der durch elektrische Heizung auf konstanter Temperatur gehalten wird. Weiter steht sie in Verbindung mit einer Batterie von fünf großen Leydener Flaschen und mit einem automatischen Potentialregler nach Gray.²⁾ Da dieser automatisch arbeitende Regler wirklich für Untersuchungen der vorliegenden Art ausgezeichnete Dienste zu leisten vermag, so sei hier kurz auf seine Konstruktion und Wirkungsweise eingegangen; vgl. Fig. 1 auf Tafel I.

Der nicht geerdete Pol der Maschine ist verbunden mit der kreisrunden Messingscheibe s_1 , die eine große Zahl von senkrecht auf ihr stehenden Nadeln n trägt. Den Nadelspitzen gegenüber steht eine zweite gleichgroße Messingscheibe s_2 , die beweglich ist und durch Spannen und Entspannen der Feder f in eine bestimmte Stellung zu den Nadelspitzen gebracht werden kann. Oben ist die Scheibe durch das Zwischenstück z isoliert, nach unten trägt sie zum Zwecke der Erdung einen plattenförmigen Ansatz a , der in einen Glastrog mit Glycerin taucht, das durch etwas Chlorcalcium leitend gemacht und mit der Erdleitung verbunden ist.³⁾ Zwischen s_1 und s_2 steht eine dritte Messingscheibe s_3 , durch die die Nadeln sämtlich leicht gängig hindurchgeführt sind. s_3 kann unabhängig von s_1 vor- und rückwärts geschoben werden, wodurch die wirksame Länge der Nadeln, die ja nichts weiter repräsentieren als eine große Zahl von Spitzennebenschlüssen zur Erde, beliebig variiert werden kann. Auch s_1 samt dem Nadelsystem kann vor- und rückwärts bewegt werden. s_1 und s_3 sitzen nämlich an konaxial geführten Glasstangen, g_1 und g_3 , so daß man also beim vollen Lauf der Maschine, ohne eine Störung zu verursachen, s_1 und s_3 gegeneinander und gegen s_2 verschieben kann. Ein ständig eingeschaltetes Hochspannungselektrometer Noackscher Form⁴⁾ zeigt die Spannung an. Man hat es in der Hand, nachdem man durch Verschieben von s_1 und s_2 zunächst eine Roheinstellung gemacht hat, mit Hilfe von s_3 den Elektrometerzeiger auf $1/10^0 = 0,2\%$ genau einzustellen zum Zwecke der Erreichung einer vorgeschriebenen Spannung.

Die Selbstregulierung erfolgt in dieser Weise: Steigt durch irgend einen Umstand, z. B. Schnellerlaufen des Motors, die Spannung an, so wird sofort die geerdete bewegliche Platte s_2 nach den negativ geladenen Spitzen hingezogen; dabei setzt momentan eine stärkere Ausstrahlung nach der nun genäherten geerdeten Platte ein, das Potential sinkt,

¹⁾ All diese Einrichtungen sind doppelt zu denken, je einmal für den Untersuchungsdraht und für den Kontrolldraht.

²⁾ A. W. Gray, Ann. d. Phys. 15 (4), 602—605, 1904.

³⁾ Das Glycerin bildet zugleich das Dämpfungsmittel für die leicht bewegliche Scheibe.

⁴⁾ R. Noack, Sonderhefte der Zs. f. d. phys. und chem. Unterricht, Band II, Heft 1.

und durch die Feder f gezogen entfernt sich s_2 wieder von den Nadelspitzen. Die stärkere Ausstrahlung hört auf, und s_2 sucht die Ruhelage auf, die durch das für die Stellung s_1, s_2, s_3 vorgeschriebene Potential bedingt ist. Sinkt die produzierte Spannung, so wird die Ausstrahlung an den Spitzen n geringer; durch den Zug der Feder f entfernt sich die Platte s_2 weiter von den Spitzen; die Ausstrahlung nimmt noch mehr ab, und das Potential steigt nun solange, bis wieder die richtige Stellung s_1, s_2, s_3 erreicht ist. — Mit dieser Gesamteinrichtung ist es möglich, ein Potential von mehreren Tausend Volt viele Stunden hindurch so konstant zu erhalten, daß keine Schwankung des dauernd eingeschalteten Hochspannungselektrometers zu bemerken ist.

Dieselbe Whimshurstmaschine soll gleichzeitig neben der ersten noch eine zweite, von der ersten verschiedene Spannung liefern für den zweiten Draht, den Kontrolldraht. Zu diesem Zweck ist von dem nicht geerdeten Pol ein Erdschluß durch ein 50 cm langes und 2 cm breites Leinenband gelegt. Mit einem auf diesem gleitenden Laufkontakt kann jede gewünschte Spannung zwischen der Maximalspannung, auf die die Maschine durch den Potentialregler gerade eingestellt ist, und der Spannung Null abgetastet werden, vorausgesetzt, daß der Widerstand dieses Nebenschlusses nicht variiert. 1200 Volt sind als Spannung für den Kontrolldraht gewählt und werden durch ein weiteres ständig eingeschaltetes Hochspannungselektrometer Braunscher Form kontrolliert.

Die Spannung an dem einen oder anderen Draht kann abgenommen und der Draht eingeholt werden, ohne daß am zweiten Draht, der weiter exponiert werden soll, und an der Maschine und der Stellung des Potentialreglers eine Änderung vorgenommen werden muß. Für Spannungen unter 1000 Volt muß überhaupt die betreffende Stelle des Leinenbandes abgetastet werden, da beim Potentialregler an den Nadelspitzen Funkenübergang eintritt, wenn man ihn auf geringere Spannungen als 1000 Volt einstellt.

Ein weiteres Elektrometer, ein Blattelektrometer, ist so aufgestellt, daß eine mit dem Spannungspol der Maschine leitend verbundene kleine Metallkugel über seiner Sonde schwebt. Wird das Elektrometer geladen und nahe der Kugel aufgestellt, so zeigt es die Art der Spannung der Maschine an durch die Änderung des Blättchenausschlags im einen oder anderen Sinn. Solange die Maschine läuft, hat man in dieser Weise eine ständige Kontrolle dafür, daß sich die Maschine nicht „umgesetzt“ hat. Dies „Umsetzen“ trat jedoch während des Laufens der Maschine nie ein, dagegen leicht nach einem Abstellen.

Bei den Untersuchungen, die die Einwirkung des Erdfeldes und die dabei auf dem Draht eintretenden eigentümlichen Verhältnisse klären sollen, bei denen also die Drähte ohne Spannung exponiert wurden, werden sie entweder oben und unten frei endigend gelassen, oder oben und unten isoliert, oder oben und unten geerdet.

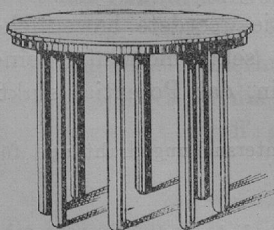


Fig. 2.

c) Einholen des Drahtes: Der aktivierte Draht wird aufgespult auf ein Gestell von der in Fig. 2 gezeigten Form. Dies Gestell ist als Aufsatz auf eine Schwungmaschine gearbeitet. Der Draht wird am unteren Ende von der Zuleitung nach der Spannungsquelle abgehakt, an einem der geriffelten Füße des Gestelles eingehakt, die Schwungmaschine in Bewegung gesetzt und der Draht sehr rasch gleichmäßig aufgespult, ohne daß er berührt wird, da die über Rollen gleitende Schnur ohne Ende

durch ein geeignetes Gegengewicht den Draht strafft. Diese kurze Einholungsdauer ist namentlich von Bedeutung bei kurzen Expositionsdauern, bei denen gerade die ersten Minuten der Abklingung beobachtet werden sollen zur Entscheidung der Frage, welche Stoffe primär aus der Luft auf den Draht abgeschieden werden.

d) Elektrometer und Untersuchung des Drahtes: Dies Gestell mit dem aufgespulten Draht ist gleichzeitig als Deckeinsatz für den Zerstreuungsraum des Untersuchungselektrometers gebaut; die Untersuchung kann daher immer sofort beginnen, die ersten Ablesungen sind $1\frac{1}{2}$ bis 2 Minuten nach Abnahme der Spannung von dem Draht gemacht. Als Elektrometer dient ein vom Verfasser schon bei früheren Arbeiten verwandtes Blattelektrometer Schmidtscher Form¹⁾ mit Mikroskop- und Fadenablesung.²⁾ Der zu untersuchende Draht umgibt den Zerstreuungskörper, einen Metallstift von 4,5 cm Länge und 4 mm Dicke in einem Abstand von 2,5 cm. Im Zerstreuungsraum herrscht bei der angewandten Spannung (250—300 Volt) Sättigungsstrom für die durch die radioaktiven Substanzen erzeugten Ionen. Die Kapazität des Elektrometers mit Deckeinsatz beträgt 5,12 cm; die Fadenablesung gestattet die Ablesung von zehntel Teilen der 100 teiligen Okularskala und damit eines Spannungsrückganges von 0,05 Volt.

Beobachtet wird für die eingebrachte radioaktive Substanz der eintretende Spannungsrückgang in der Zeiteinheit; dieser dient dann zur Berechnung des Sättigungsstromes, den die Substanz in den einzelnen Zeitpunkten ihres Zerfalls zu unterhalten imstande ist. In Abrechnung zu bringen ist bei jeder Beobachtung der „Reststrom“, der im Elektrometer fließt, einmal infolge der natürlichen Ionisation der Luft im Zerstreuungsgefäß ohne künstlich hineingebrachte radioaktive Substanz, dann infolge des Elektrizitätsüberganges über die isolierende Stütze. Dieser Reststrom, der vor jedem Versuch neu bestimmt wird, ergibt sich bei normalen Verhältnissen aus einem Spannungsrückgang um einen kleinen Skalenteil in einer halben Stunde zu $i = 5 \times 10^{-7} \frac{\text{E. S. E.}}{\text{sec}}$. Auf einen interessanten zahlenmäßigen Zusammenhang zwischen der Größe dieses Reststromes und der Wirkung der sogenannten „durchdringenden“ Strahlung in der Atmosphäre wird später eingegangen werden.

Die Abklingung der auf den Drähten angesammelten Stoffe wird stets solange verfolgt, bis dieser Reststrom stark in Betracht kommt gegenüber dem durch die radioaktiven Stoffe erzeugten Strom. Je nach der Menge und Art dieser Substanzen bei den verschiedenen Versuchsbedingungen konnte die Abklingung bis über 70 Stunden lang verfolgt werden. Die Auswertung des Zahlenmaterials und die Aufstellung der Kurven ist in derselben Weise geschehen wie in der Arbeit von H. W. Schmidt und dem Verf.: Über die Radioaktivität von Quellen in Hessen und Nachbargebieten.³⁾

Über die Versuchsanordnung zur quantitativen Bestimmung des Gehaltes der Luft an radioaktiven Stoffen vgl. K. Kurz, Phys. Zs. 9, 177—184, 1908; Phys. Zs. 9, 218—221, 1908.

Zu bemerken wäre schließlich noch, daß der zur Verwendung kommende Kupferdraht metallisch blanke Oberfläche hatte, und daß jeder Draht nur einmal benutzt wurde.

¹⁾ H. W. Schmidt, Phys. Zs. 6, 561, 1905. K. Kurz, Dissertation, Gießen 1907, S. 4; Ann. d. Phys. 24 (4), 897, 1907.

²⁾ K. Kurz, Phys. Zs. 7, 375, 1906.

³⁾ H. W. Schmidt und K. Kurz, Phys. Zs. 7, 209—224, 1906.

Untersuchungen.

I. Teil.

Über die Natur der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre.

A. Grundlagen einer Analyse der Stoffe.

Die Analyse der auf den Drähten angesammelten radioaktiven Substanzen ist so gedacht, daß versucht werden soll, die Abklingungskurve, die durch die Expositionszeit bestimmt ist, als eine Übereinanderlagerung von drei Komponenten aufzufassen, als Kombination einer Radium-, einer Thorium- und einer Aktiniumkurve. Diese drei müßten identisch sein mit theoretischen Kurven von Radium, Thorium und Aktinium, die man für die gleiche Expositionszeit konstruieren kann, wenn man irgend einen Wert der Abklingungskurve kennt.

Es ist also zunächst zu zeigen, wie man in einfacher Weise die Abklingungskurve für Radium-, Thorium-, Aktiniumniederschläge konstruieren kann, wenn man einen beliebigen Wert kennt, der nicht gerade der Anfangswert zu sein braucht.

Gleichung (2) S. 9 läßt sich auch schreiben

$$(7) \quad I = k' \mathfrak{A} + \mathfrak{B} + k'' \mathfrak{C},$$

wenn wir durch k_2 dividieren oder $k_2 = 1$ setzen, da es sich zunächst um relative Messungen handelt. Aus demselben Grund setzen wir in Gleichung (1) $q' = 1$ und erhalten nun in I ein relatives Maß für die Ionisierung in dem betreffenden Zerstreungsgefäß. $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ geben die zur Zeit t im Zustand des Zerfalls befindlichen Atome der betreffenden einzelnen radioaktiven Stoffe. I ist damit ein Maß für die Gesamtmenge der zur Zeit t im Zustand des Zerfalls befindlichen Atome und damit, da immer innerhalb einer gewissen Zeit derselbe Bruchteil der überhaupt vorhandenen Menge einer radioaktiven Substanz durch Zerfall verschwindet, auch ein Maß für die auf dem Draht vorhandene Menge.

Setzen wir t , die Beobachtungszeit, die Zeit seit Schluß der Aktivierung, $= 0$, so erhalten wir somit den Anfangswert für die abklingende Substanz oder den Wert I_0 für die nach einer Aktivierungsdauer Θ auf dem Draht angesammelte Substanzmenge. Es ist dann nach (1) und (2) S. 9

$$(8) \quad \begin{aligned} I_{\Theta} &= a_1' + a_2' + k''(a_3' + a_4' + a_5') + k' \\ &\quad - e^{-\lambda_1' \Theta} (a_1' + k'' a_3' + k') \\ &\quad - e^{-\lambda_2' \Theta} (a_2' + k'' a_4') \\ &\quad - e^{-\lambda_3' \Theta} k'' a_5' \end{aligned}$$

wenn

$$(9) \quad \begin{cases} a_1' = \frac{\lambda_2'}{\lambda_2' - \lambda_1'}, & a_2' = \frac{\lambda_1'}{\lambda_1' - \lambda_2'}, & a_3' = \frac{\lambda_2' \lambda_3'}{(\lambda_1' - \lambda_2')(\lambda_1' - \lambda_3')}, \\ a_4' = \frac{\lambda_3' \lambda_1'}{(\lambda_2' - \lambda_3')(\lambda_2' - \lambda_1')}, & a_5' = \frac{\lambda_1' \lambda_2'}{(\lambda_3' - \lambda_1')(\lambda_3' - \lambda_2')}. \end{cases}$$

Für den Fall des Radiums sind $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ die Radioaktivitätskonstanten für Ra A, Ra B, Ra C, also

$$\lambda_1 = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\lambda_2 = 4,33 \cdot 10^{-4} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\lambda_3 = 5,93 \cdot 10^{-4} \text{ (sec}^{-1}\text{).}^1$$

Die Proportionalitätsfaktoren k', k'' , deren Bedeutung oben erörtert ist, sind, wie später gezeigt wird, für das hier angewandte Ionisierungsgefäß gleich 6,0 bzw. 8,0 zu setzen.

Die nach der Abklingungszeit t davon noch vorhandene Menge I_t verhält sich zu dieser Anfangsmenge I_{Θ}

$$(10) \quad \frac{I_t}{I_{\Theta}} = \frac{M' e^{-\lambda_1' t} + N' e^{-\lambda_2' t} + O' e^{-\lambda_3' t}}{M' + N' + O'}$$

wo

$$(11) \quad \begin{cases} M' = m' (1 - e^{-\lambda_1' \Theta}) \\ N' = n' (1 - e^{-\lambda_2' \Theta}) \\ O' = o' (1 - e^{-\lambda_3' \Theta}) \\ m' = k' + a_1' + k'' a_3' \\ n' = a_2' + k'' a_4' \\ o' = k'' a_5' \end{cases} \quad \text{ist.}$$

Da I_{Θ} für den einzelnen Versuch mit bekanntem Θ eine meßbare Größe, der beobachtete Anfangswert der Ionisierung ist, so erhalten wir

$$(12) \quad I_t = \text{constante}' [M' e^{-\lambda_1' t} + N' e^{-\lambda_2' t} + O' e^{-\lambda_3' t}].$$

Es läßt sich also ein beliebiger Wert I_t , ein beliebiger Punkt der Abklingungskurve und damit diese selbst berechnen, wenn irgend ein Kurvenpunkt, z. B. I_{Θ} , der Anfangswert, gegeben ist.

Noch einfacher gestaltet sich die Sache, wenn wir zur Darstellung der entsprechenden Abklingungskurven bei Thorium und Aktinium übergehen. In der Formel (2)

$$I = k_1 A + k_2 B + k_3 C$$

¹⁾ H. W. Schmidt, a. a. O., S. 628.

können wir setzen $k_1 = 0$, $k_3 = 0$ für Thorium, da der Zerfall von Thor A ohne Aussendung von Strahlen verläuft, Thor C dieselben Strahlen wie Thor B aussendet und so rasch zerfällt, daß wir zur selben Kurvenform kommen, wenn wir annehmen, das von Thor C ausgesandte α -Teilchen gehe noch von Thor B aus. (Der hierdurch bedingte Fehler ist bei den hier in Betracht kommenden Mengen unmerklich, da das Verhältnis der Halbwertszeiten von Thor C und Thor B von der Größenordnung $1/1000$ ist.) Es ist dann nur darauf zu achten, daß wir nun den Zerfall von Thor B unter der Annahme der Aussendung von zwei α -Teilchen zu betrachten haben. Setzen wir ferner wie oben $k_2 = 1$, so erhalten wir als Anfangsaktivität des in der Zeit Θ angesammelten Thoriumniederschlags:

$$(13) \quad I_{\Theta}'' = a_1'' (1 - e^{-\lambda_1'' \Theta}) + a_2'' (1 - e^{-\lambda_2'' \Theta}).$$

Hier ist wieder entsprechend

$$a_1'' = \frac{\lambda_2''}{\lambda_2'' - \lambda_1''}, \quad a_2'' = \frac{\lambda_1''}{\lambda_1'' - \lambda_2''}.$$

Die nach der Abklingungszeit t davon noch vorhandene Substanzmenge I_t'' verhält sich zu I_{Θ}'' wie

$$(14) \quad \frac{I_t''}{I_{\Theta}''} = \frac{M'' e^{-\lambda_1'' t} + N'' e^{-\lambda_2'' t}}{M'' + N''}$$

wo

$$\begin{aligned} M'' &= a_1'' (1 - e^{-\lambda_1'' \Theta}) \\ N'' &= a_2'' (1 - e^{-\lambda_2'' \Theta}) \quad \text{ist.} \end{aligned}$$

Da wieder I_{Θ}'' für einen bestimmten Versuch eine gemessene Größe ist, so erhalten wir für die Konstruktion der Thoriumniederschlagskurve

$$(15) \quad I_t'' = e'' (M'' e^{-\lambda_1'' t} + N'' e^{-\lambda_2'' t}),$$

oder auch

$$(15a) \quad I_t'' = c_1'' (R e^{-\lambda_1'' t} - S e^{-\lambda_2'' t})$$

wo

$$c_1'' = \frac{I_{\Theta}''}{R - S},$$

$$R = \lambda_2'' (1 - e^{-\lambda_1'' \Theta})$$

$$S = \lambda_1'' (1 - e^{-\lambda_2'' \Theta}) \quad \text{ist.}$$

Hier ist

$$\begin{aligned} \lambda_1'' &= 1,816 \cdot 10^{-3} (\text{sec}^{-1}) \\ \lambda_2'' &= 1,913 \cdot 10^{-4} (\text{sec}^{-1}) \end{aligned} \quad ^1)$$

Die entsprechenden Formeln mit

$$\begin{aligned} \lambda_1''' &= 3,23 \cdot 10^{-4} (\text{sec}^{-1}) \\ \lambda_2''' &= 5,38 \cdot 10^{-3} (\text{sec}^{-1}) \end{aligned} \quad ^2)$$

¹⁾ F. v. Lerch, Wien. Ber. 116 (II a), S. 1450, 1907.

²⁾ E. Rutherford, Radioaktive Umwandlungen, S. 165, 1907.

gelten für Aktinium, da wir beim Zerfall der Aktiniumemanation und der entsprechenden Niederschlagsprodukte insofern für unsere Zwecke einen dem Thoriumzerfall analogen Vorgang vor uns haben, als Aktinium C nur β -Strahlen aussendet.

Es ist also möglich, in einfacher Weise aus irgend einem Wert der Abklingungskurve, der, wie gesagt, nicht der Anfangswert zu sein braucht, die Kurve selber zu konstruieren, wenn die Aktivierungsdauer bekannt ist. Eine Variation der Aktivierungsdauer liefert also die Möglichkeit, Kurvenformen von sehr verschiedener Art zu erhalten. Dies gestattet die Verallgemeinerung von Resultaten, die bei einer einzelnen Zerlegung gewonnen sind.

Eine Integration der Formeln (2), (4), (6) über t bei konstanten Θ , von $t = 0$ bis $t = \infty$ würde die Gesamtmenge der auf dem Draht vorhandenen radioaktiven Substanz liefern. Für unsere Zwecke — wir schließen immer von der Ionisation im Zerstreuungsgefäß auf die Menge der momentan zerfallenden Substanz und wollen schließlich einen Zusammenhang zwischen der „Aktivierungszahl“ und dem Gehalte der Luft an radioaktiven Stoffen finden — sind jedoch die Formeln (2), (4), (6) und die hier gegebenen Umrechnungen in (12), (15), (15a) am bequemsten.

B. Die Analyse.

1. Wirkungen einer Variation der Expositionszeit.

Fig. 3 zeigt eine Zusammenstellung von Aufnahmen, die bei einer Variation der Expositionsdauer von 15 sec bis 209 Stunden ausgeführt sind. Eingetragen ist als Abzisse die Abklingungszeit, als Ordinate der Logarithmus der Aktivität des Drahtes. Die der einzelnen Kurve beigegebene Zeitangabe ist die Aktivierungsdauer. Der Übersicht halber, um die es sich hier zunächst handelt, sind die Drähte nicht mit ihrer wahren, zahlenmäßigen Aktivität eingetragen; die Ordinatenwerte verschiedener Kurven sind also nicht direkt miteinander vergleichbar. Auch der Angabe des Kontrolldrahtes ist noch nicht Rechnung getragen. Es soll hier zunächst die Änderung der Kurven bei einer Änderung der Expositionszeit gezeigt werden.

Wenn wir zunächst die allgemeinen Übereinstimmungen ins Auge fassen, so fallen bei jeder Kurve im wesentlichen drei Teile auf: Ein ausgesprochen steiler Abfall, der um so steiler wird, je kürzer die Expositionszeit ist, eine zweite etwas flachere Partie, die bei vier Stunden Abklingungszeit zu Ende ist, und ein dritter weit flacher verlaufender Teil, der um so ausgeprägter hervortritt, je länger die Expositionszeit war. Der erste Teil verläuft um so steiler, je kürzer die Expositionszeit war, der letzte Teil hat um so früher eine konstante Neigung erreicht, je länger die Expositionszeit gewählt wurde. Bekanntlich schreibt man die beiden ersten Teile im wesentlichen der Abklingung der Radiumniederschläge zu — besser der Abklingung der Niederschläge vom Radiumtypus; der letzte Teil ist der für die Anwesenheit von Thorium charakteristische Kurvenast.

Selbst beim Heruntergehen bis auf eine Expositionszeit von nur 15 sec ist die Anfangshalbwertszeit nie geringer als drei Minuten. Und beim Hinaufgehen mit der Expositionszeit bis auf 209 Stunden steigt die Halbwertszeit nie über ca. 11 Stunden. Diese Tatsache gestattet eine Anzahl von Schlüssen auf die Art und die Mengenverhältnisse der

in der Luft überhaupt vorhandenen radioaktiven Substanzen, sowie auf ihr Verhalten im elektrischen Felde, sobald gezeigt worden ist, in welchem Zusammenhang Expositionszeit und Menge des erhältlichen radioaktiven Niederschlags stehen.

a) Maximalaktivität und Maximalaktivierungsdauer.

I. Auf dem exponierten Draht herrscht radioaktives Gleichgewicht, z. B. für die Zerfallsprodukte des Radiums, wenn die in der Zeiteinheit durch Zerfall verschwindende Menge radioaktiver Substanz gleich ist der in der Zeiteinheit sich neu absetzenden Menge; nach Gleichung (1), wenn

$$\mathfrak{A}' = \mathfrak{B}' = \mathfrak{C}' \quad \text{ist.}$$

Daraus folgt, daß ein Grenzwert, den wir als Maximalaktivität bezeichnen wollen, bei der speziellen Versuchsanordnung, der Länge des Drahtes, der angewandten Spannung, der Menge der in der Atmosphäre augenblicklich überhaupt vorhandenen Substanz erreicht werden kann. Nach Gleichung (8) S. 17 ist diese Maximalaktivität erreicht, wenn

$$(16) \quad e^{-\lambda_1' \Theta'} (a_1' + k'' a_3' + k') + e^{-\lambda_2' \Theta'} (a_2' + k'' a_4') + e^{-\lambda_3' \Theta'} k'' a_5' = 0 \quad \text{ist.}$$

Da $\lambda_1' > \lambda_3' > \lambda_2'$, so ist bei der Größe der Koeffizienten der Exponentialfunktionen der Exponent $\lambda_2' \Theta'$ für die Bestimmung von Θ' praktisch der maßgebende. Also

$$(17) \quad e^{-\lambda_2' \Theta'} (a_2' + k'' a_4') = 0$$

oder praktisch

$$(17a) \quad e^{-\lambda_2' \Theta'} (a_2' + k'' a_4') = 1/1000$$

liefert die Zeit Θ' , nach deren Ablauf die Maximalaktivität von Radiumzerfallsprodukten auf dem Draht bei unseren Spezialverhältnissen erreicht ist.

$$(18) \quad \Theta' = \frac{\ln [1000 (a_2' + k'' a_4')]}{\lambda_2'}$$

In gleicher Weise erhalten wir für Thorzerfallsprodukte als maximale Aktivierungsdauer

$$(19) \quad \Theta'' = \frac{\ln(1000 \cdot a_1'')}{\lambda_1''}$$

und für Aktinium

$$(20) \quad \Theta_1''' = \frac{\ln(1000 \cdot a_1''')}{\lambda_1'''}$$

Das heißt, die auf einem Draht ansammelbare Menge radioaktiver Substanz hat bei den gewählten Versuchsbedingungen einen Wert erreicht, der sich von dem denkbaren Maximalwert nur um 1‰ unterscheidet, wenn für

Radium ca. 4 $\frac{1}{2}$ Stunden, für

Thorium ca. 109 $\frac{1}{2}$ Stunden, für

Aktinium ca. 6 Stunden

aktiviert worden ist.

Da die vorkommenden Faktoren $a_2' + k'' a_4'$, a_1'' , a_1''' ihrem für unsere Versuchsanordnung gültigen Zahlenwerte nach für die Größenordnung dieser maximalen Aktivierungsdauern Θ

ohne größere Bedeutung sind, so können wir allgemein sagen: Eine radioaktive Substanz mit der Radioaktivitätskonstanten λ (in sec^{-1}) hat auf einem zu aktivierenden Körper bis auf $1/1000$ den Maximalwert erreicht in einer Zeit

$$\Theta = \frac{\ln 1000}{\lambda}.$$

Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung der hier in Betracht kommenden Zerfallsprodukte der drei Familien Radium, Thorium, Aktinium mit den zugehörigen Θ .

Tabelle 1.

Substanz	Θ
Ra A	29' 54"
Ra B	4h 25' 40"
Ra C	3h 4' 00"
Th A	109h 35'
Th B	9h 7' 30"
Th C	ca. 10"
Akt A	5h 55' 50"
Akt B	21' 24"
Akt C	50' 57"

II. Die nach einer beliebigen Aktivierungszeit Θ_1 erreichte Aktivität verhält sich zu der in der Maximalaktivierungszeit Θ (Spalte 2 in Tab. 1) erreichbaren Maximalaktivität im Falle des Radiums wie

$$(21) \quad \frac{I'_{\Theta_1}}{I'_{\Theta}} = \frac{c' - e^{-\lambda_1' \Theta_1} (a_1' + k'' a_3' + k') - e^{-\lambda_2' \Theta_1} (a_2' + k'' a_4') - e^{-\lambda_3' \Theta_1} k'' a_5'}{c'}$$

wo

$$(22) \quad c' = a_1' + a_2' + k'' (a_3' + a_4' + a_5') + k'.$$

Daraus läßt sich also entweder die Maximalaktivität aus einer speziellen Aktivität berechnen oder einfach, worauf es hier zunächst allein ankommt, das Verhältnis der beiden zueinander angeben.

Für Thor gestalten sich die Verhältnisse einfacher:

$$(23) \quad \frac{I''_{\Theta_1}}{I''_{\Theta}} = \frac{c'' - a_1'' e^{-\lambda_1'' \Theta_1} - a_2'' e^{-\lambda_2'' \Theta_1}}{c''}$$

wo

$$(24) \quad c'' = a_1'' + a_2''.$$

Eine entsprechende Formel gilt für Aktinium.

Hieraus ergibt sich als Resultat, was wir hier vorweg nehmen wollen, obwohl wir diesen Umstand erst später benötigen: Es ist zur Erkennung der Verhältnisse in der Atmosphäre nicht nötig, einen Draht bis zur Erreichung des radioaktiven Gleichgewichtes zu aktivieren, also wegen des langsam zerfallenden Thorium A nach Tab. 1 bis 109 Stunden.

Da, wie unsere Versuche zeigen und wie aus Fig. 3 ersichtlich, beispielsweise die Thoraktivität schon nach einer Expositionszeit von 30 Minuten über 23 Stunden ihrer Abklingung verfolgt werden kann, so erhält man ein viel besseres Bild bei solch kurzer Expositionszeit, als wenn man 109 Stunden exponieren wollte. Denn bei so langer Exposition treten alle Schwankungen im Vorkommen der einen Substanz zurück zugunsten des Gesamtbildes; man erhält dann nur einen für die ganze, sich über mehrere Tage erstreckende Expositionszeit gültigen Mittelwert. Eine möglichst kurze Expositionszeit in Verbindung mit einer Umrechnung der erhaltenen Werte auf die möglichen Maximalwerte liefert das beste Bild der augenblicklichen Verhältnisse in der Atmosphäre.

b) Ergebnisse sehr langer und sehr kurzer Expositionszeiten.

Fig. 3 zeigt nun, daß eine Erhöhung der Aktivierungsdauer über die durch den langsamen Zerfall von Thorium *A* bedingte Aktivierungsdauer von 109 Stunden keine Änderung der Kurvenform mehr hervorbringt. Wenn auch aus äußeren Gründen nur bei einem Beispiel über die Aktivierungsdauer von 109 Stunden hinausgegangen ist, so ist doch der Kurvenverlauf bei den hohen Aktivierungszeiten in den späteren Beobachtungszeiten so gut übereinstimmend, daß wir schließen können: Nach einer Aktivierungsdauer von 109 Stunden ist auf dem Draht tatsächlich für alle in der Atmosphäre vorkommenden radioaktiven Stoffe das radioaktive Gleichgewicht erreicht. Daraus folgt, daß in der Atmosphäre keine radioaktive Substanz mit einer Halbwertszeit größer als der des Thorium *A* existiert, wenigstens nicht in nachweisbarer, d. h. für unsere Versuche in Betracht kommender Menge.

Was besagen andererseits die Kurven für kleine Aktivierungsdauern bis herunter zu wenigen Sekunden? Der rapide Abfall in der ersten Periode der Abklingung zeigt beim Heruntergehen mit der Aktivierungsdauer bis auf 4 Sekunden stets die reine Halbwertszeit von 3 Minuten, die Halbwertszeit von Ra *A* (vgl. die Fig. 4 und 5 mit 30 Sekunden bzw. 1 Minute Aktivierungsdauer).

Die Anfangsperiode der Abklingung ist also nicht durch Überlagerung einer langsameren Abklingung geändert. Nehmen wir das Beispiel von Fig. 4, so läßt sich aus obigen Formeln berechnen, daß nach 30 Sekunden Aktivierungszeit etwa 12% des Maximalwertes von Ra *A* angesammelt sind, und daß etwa 2% des Maximalwertes von Ra *C* (auch etwa des Wertes von Ra *B*) angesammelt wären, wenn auch Ra *B* und Ra *C* primär abgeschieden würden, d. h. sich direkt aus der Luft auf den negativ geladenen Draht niedersetzen könnten. Nehmen wir nur die α -Strahlung von Ra *A* und Ra *C* als maßgebend für die Ionisierung im Zerstreuungsgefäße an und sehen wir selbst von der verschiedenen Reichweite der beiden α -Strahlenarten ab, so ergibt sich, daß eine starke Beeinflussung der reinen Abklingung von Ra *A* durch Ra *B* und Ra *C* zu beobachten sein müßte. Der Effekt einer Verlangsamung des anfänglichen Steilabfalls mit 3 Minuten als Halbwertszeit müßte hier stark hervortreten, da sich die Halbwertszeiten von Ra *A* und Ra *C* etwa wie 1:6, die von Ra *A* und Ra *B* etwa wie 1:9 verhalten. Eine Verlangsamung der Abklingung ist jedoch nicht zu beobachten. Es ist daraus zu schließen, daß von den im Zustand des radioaktiven Gleichgewichts auf dem Draht vorhandenen Substanzen Ra *A*, Ra *B*, Ra *C* nur das erste Glied, Ra *A*, primär auf den negativ geladenen Draht

niedergeschlagen worden ist, daß dagegen Ra *B*, Ra *C* erst sekundär, auf dem Draht, aus dem hier bereits vorhandenen Ra *A* sich gebildet haben.¹⁾

Auch eine Verkürzung dieser anfänglichen Halbwertszeit von 3 Minuten ist nicht zu konstatieren. Daraus läßt sich jedoch nicht ableiten, daß nicht etwa das mit einer Halbwertszeit von höchstens 1 Sekunde²⁾ abklingende, α -strahlende Thor *C* sich primär auf dem Draht niedergelassen hätte. Denn wenn auch hier bereits nach 10 Sekunden die Maximalaktivität erreicht ist, die stark in Betracht kommen könnte gegenüber der in gleicher Zeit sich ansammelnden Menge Ra *A*, so ist hier der Umstand ausschlaggebend, daß die Halbwertszeit des Thorium *C* von der Größenordnung einer Sekunde ist, so daß man nicht erwarten kann, nach 1½ Minuten noch meßbare Mengen vorzufinden; und erst etwa 1½ Minuten nach Abnahme der Spannung konnte die Untersuchung des Drahtes beginnen.

Es ist jedoch denkbar, und die Ansicht gewinnt jedenfalls mit den vorstehenden bei Ra *A*, *B*, *C* gefundenen Resultaten an Wahrscheinlichkeit, daß auch hier beim Thorium nur das erste aus der Emanation sich bildende Zerfallsprodukt eine positive Ladung trägt und darum im elektrischen Felde nach dem negativ geladenen Drahte wandert. Die Aussendung eines positiv geladenen α -Teilchens, sei es mit einer Geschwindigkeit, die zur Ionenerzeugung ausreicht wie bei Ra *A*, sei es mit einer nur um etwa 30% geringeren Geschwindigkeit, so daß keine Ionisierung mehr eintreten kann, wie vielleicht bei dem „strahlenlosen“ Thor *A* und Aktinium *A*, bedingt dann das Entstehen des negativ geladenen folgenden Zerfallsproduktes. Dieses würde dann im elektrischen Felde an die Anode wandern, wenn es nicht während der Lebensdauer bereits durch Wiedervereinigung mit irgend einem positiv geladenen Masseteilchen, z. B. mit positiven Ionen oder durch Adsorption an Rauch, Staub, Wasserdampf, der es ja bei negativer Ladung mehr ausgesetzt ist als bei positiver, elektrisch neutral geworden ist oder doch in seiner Beweglichkeit so heruntergedrückt, daß es den Kraftlinien unseres Feldes nicht mehr folgt.

Da die Zeit, in der Wiedervereinigung und Adsorption von radioaktiven Zerfallsprodukten stattfinden kann, klein ist gegenüber der Lebensdauer, so ist die Aktivierung eines Drahtes in der freien Atmosphäre wohl folgendermaßen zu denken: Der Draht wird von der gasförmigen Emanation umspült; das in unmittelbarer Nähe des Drahtes entstehende erste Zerfallsprodukt wandert nach der Kathode, setzt sich also auf dem negativ geladenen Drahte ab. — Es ist natürlich durchaus nicht gesagt, daß nicht auch geringe Mengen der übrigen Zerfallsprodukte sich absetzen; vgl. auch H. W. Schmidt, a. a. O., S. 626 Anmerkung und K. Kurz, Dissertation, S. 55, Anmerkung 2, wo darauf hingewiesen wird, daß in einem emanationshaltigen Gefäß auf einem ungeladenen Draht vielleicht auch Ra *B* und Ra *C*, freilich im Vergleich zu Ra *A* in sehr geringen Mengen, niedergeschlagen werden.

Wir können hier also bei der Deutung der Kurven und ihrer Analyse von der Voraussetzung ausgehen, daß nur das erste aus der Emanation entstehende Zerfallsprodukt sich in meßbarer Menge auf dem negativ geladenen Draht niederschlägt. Damit aber

¹⁾ Vgl. auch H. W. Schmidt, a. a. O.

²⁾ O. Hahn und L. Meitner, Verh. d. D. Phys. Ges. 11, 55–62, 1909.

sind die Voraussetzungen erfüllt, unter denen die oben gegebenen Formeln abgeleitet sind. Wir können sie also nebst den aus ihnen gewonnenen Folgerungen unseren weiteren Betrachtungen zugrunde legen.

c) Zerlegung der Abklingungskurven in 3 Komponenten.

a) Abtrennung der Thorkomponente.

An einem Beispiel soll gezeigt werden, wie die Zerlegung der Abklingungskurven, also die Analyse, durchweg ausgeführt wurde.

Fig. 6 zeigt die Abklingung eines Drahtes, der bei einer Spannung von — 4600 Volt 1 Stunde exponiert war. Die 3 Hauptpartieen sind scharf ausgeprägt: Der anfängliche Steilabfall bis $t = 1\frac{1}{2}$ Stunden, dann ein langsamerer Abfall bis $t = 4$ Stunden, von da an ein weit flacher verlaufender Schlußteil. Wie schon oben bemerkt, gehören die beiden ersten Teile der Aktivität vom Radiumtypus an, der 3. Teil der Thoraktivität; wir können die beiden ersten Teile also zunächst ausscheiden. Man sieht sofort, — und darauf sei schon hier hingewiesen — welche große Bedeutung der Thoraktivität zukommt, wenn man berücksichtigt, daß nach S. 21 nur etwa $\frac{1}{50}$ der erreichbaren Maximalthoraktivität nach einer Aktivierungsdauer von 1 Stunde angesammelt ist.

Die Abtrennung der Thorkomponente ist daher zuerst vorzunehmen.

Ist I_0 die Anfangsaktivität, die nach der Aktivierungszeit Θ erreicht und zu Beginn der Beobachtung, zur Zeit $t = 0$, vorhanden ist, und ist I_t die nach einer Abklingungszeit t noch vorhandene Aktivität, so verhält sich nach Formel (15a) im Falle des Thoriums

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{R \cdot e^{-\lambda_1 t} - S e^{-\lambda_2 t}}{R - S}$$

wo

$$R = \lambda_2 (1 - e^{-\lambda_1 \Theta})$$

$$S = \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_2 \Theta}),$$

oder auch

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{T \cdot e^{-\lambda_1 t} - U e^{-\lambda_2 t}}{T - U}$$

wo

$$T = \frac{1 - e^{-\lambda_1 \Theta}}{\lambda_1},$$

$$U = \frac{1 - e^{-\lambda_2 \Theta}}{\lambda_2} \text{ ist.}$$

Für den vorliegenden Fall haben wir aber

$$\lambda_1 = 1,816 \cdot 10^{-5} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\lambda_2 = 1,913 \cdot 10^{-4} \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

$$\Theta = \text{Aktivierungsdauer} = 3600 \text{ sec und}$$

$$I_0, \text{ die Anfangsaktivität wollen wir} = 100 \text{ setzen. Dann wird}$$

$$T = 3484,8,$$

$$U = 2602,0 \text{ und}$$

$$(25) \quad I_t = 100 \cdot \frac{3484,8 e^{-\lambda_1 t} - 2602,0 e^{-\lambda_2 t}}{882,8}.$$

Mißt man in Fig. 6 I_t für ein beliebiges t , z. B. für $t = 6$ Stunden, und berechnet man mit (25) weitere Werte für $t = 7, 8, 9 \dots$ Stunden, so findet man, daß berechnete und beobachtete Punkte auf derselben Kurve liegen, die sich damit als Abklingungskurve des Thoriumniederschlags erweist.

Die Thorkurve ist nun von der Hauptkurve zu subtrahieren. Zu diesem Zwecke wird der Anfangswert, Wert für $t = 0$, aus den abgemessenen Werten bei $t = 6$ Stunden, 8, 10 $\dots$ Stunden gesucht und nun der genaue Verlauf der Thorkurve in den ersten vier Stunden der Abklingung berechnet. Es wird also eine Art „Rückscherung“ vorgenommen.

Tabelle 2.

Thorium; 1 ^h Aktivierung	
Abklingungszeit in Min.	Aktivität
0	100,00
15	140,24
30	170,27
60	221,72
120	272,00
150	282,53
180	287,13
210	287,55
240	285,85
300	275,25
360	262,04
420	247,42
480	232,80
600	204,99
660	192,17
1320	93,69

Tabelle 2 gibt eine solche Berechnung, Fig. 7 zeigt für die ersten vier Stunden die konstruierte Thorkurve a und die beobachtete Kurve b , von der sie abzuzählen ist. Für jeden beobachteten Wert dieser Kurve b wird aus der 10 fach vergrößerten Thorkurve c der betreffende Wert für die Thoraktivität abgelesen und in Abrechnung gebracht. Fig. 8, Kurve a zeigt das Ergebnis dieser Subtraktion. Der so erhaltene Thoranteil ist nun noch abhängig von der Expositionszeit des Drahtes. Damit er mit anderen Angaben vergleichbar ist und ein Bild des Zustandes der Atmosphäre während der Expositionsdauer zu geben vermag, ist nun mit Hilfe von Formel (23) und (24) berechnet, welche Höhe er erreicht hätte, wenn der Draht bis zur Maximalaktivierungszeit, 109 Stunden für $^{999}/_{1000}$, exponiert worden wäre.

β) Abtrennung der Aktiniumkomponente.

Kurve a in Fig. 8, der nach Abzug der Thoraktivität verbleibende Rest, zeigt eine Gesamtabklingungszeit von etwa 4 Stunden. Das heißt, nach Verlauf dieser Zeit ist die Aktivität praktisch gleich Null geworden. Kurve a ist nun noch aufzufassen als eine

Kombination einer Abklingungskurve von Radiumzerfallsprodukten mit einer von Aktiniumzerfallsprodukten. Die Abtrennung des Aktiniumanteils kann nicht mit solcher Sicherheit vorgenommen werden, wie die Subtraktion der Thorkomponente, da eben Radium- und Aktiniumniederschläge gleichermaßen nach etwa 4 Stunden verschwunden sind.

Zur Konstruktion der Radium- und Aktiniumkurven dienen die Gleichungen (10) und (15) bzw. (15a). Fassen wir den Wert für $t = 5$ Minuten in Kurve a , der experimentell erhaltenen Kurve, als herrührend von reinen Radiumzerfallsprodukten auf, so liefert er uns in seiner Abklingung die Kurve b ; berechnen wir aus diesem Verlauf der Kurve ihren Anfangswert, den Wert für $t = 0$, und fassen wir nun diesen als allein herrührend von Aktiniumzerfallsprodukten auf, so erhalten wir Kurve c . Man sieht, daß sich die Ordinaten der experimentell erhaltenen Kurve a in der Form darstellen lassen

$$Y_a = m y_b + n y_c = m y_{\text{Ra}} + n y_{\text{Akt}},$$

wann y_{Ra} und y_{Akt} die Ordinaten der vom gleichen Anfangswert aus konstruierten Radium- bzw. Aktiniumkurven sind. Es ist also Kurve a als eine Summation einer Kurve vom Typus b und einer solchen vom Typus c aufzufassen. Der Haupttypus freilich ist der der Radiumkurve; darüber gelagert hat sich die Wirkung einer in den ersten Zeiten des Zerfalls langsamer abklingenden Substanz, die bei den hier in Betracht kommenden Möglichkeiten eben nur Aktinium sein kann.

Schon aus der Abweichung in den mittleren Partien läßt sich erkennen, daß der Prozentgehalt der Kurve an Aktiniumzerfallsprodukten kein bedeutender ist. Aus dieser Abweichung ist zunächst in erster Annäherung ausgemessen, welche Zusammensetzung von Radium und Aktinium die beobachtete Kurve ergeben könnte. Die entsprechende Kombinationskurve wird gemäß Formeln (10) und (15a) konstruiert und zur Deckung gebracht mit der beobachteten Kurve. Eine eventuell noch vorhandene Abweichung liefert eine zweite Korrektur und damit dann die beiden Kurven für Radium und Aktinium, die in ihrer Kombination die beobachtete Kurve ergeben. In Fig. 9 ist die ausgezeichnete Kurve eine solche Kombinationskurve aus 100 Teilen Radiumzerfallsprodukten und 2 Teilen Aktiniumzerfallsprodukten und zwar für das in den vorhergehenden Figuren behandelte Beispiel. Die eingezeichneten Kreuze sind die beobachteten Werte, die in Fig. 7 durch Abziehen der Thorkomponente erhalten wurden. Man sieht, die Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Werten ist vollkommen.

An dem vorliegenden Beispiele ist also gezeigt worden, daß die radioaktiven Substanzen, die sich in der Atmosphäre während der Versuchszeit auf dem Drahte abgesetzt haben, sich zerlegen lassen in drei Komponenten: Radium-, Thorium- und Aktiniumzerfallsprodukte.

Eine Deutung der Abklingungskurven in diesem Sinn ist möglich, wenn man einmal für jede Aktivierungsdauer gesondert die Zahlenwerte der in den Formeln (8) bis (15) vorkommenden Größen ermittelt, zweitens für das Ionisierungsgefäß, mit dem gearbeitet wird, die Faktoren bestimmt, mit denen die Zahl der zerfallenden Atome der einzelnen Substanzen, also die Stärke des radioaktiven Prozesses, zu multiplizieren ist, wenn die Ionisation im Ionisierungsgefäß als Maß für die vorhandene Menge gedient hat. In der angewandten Formel

$$I = k_2 (k' A + B + k'' C)$$

handelt es sich um die Größen k' und k'' , da wir $k_2 = 1$ setzen können, wie oben gezeigt wurde. k' ist für das hier benutzte Elektrometer $= 6,0$, $k'' = 8,0$.¹⁾

Da es sich in dem eben behandelten Beispiel um eine Aktivierungsdauer von 1 Stunde handelt, so kann man auch wieder für den Radium- und für den Aktiniumanteil aus dem jetzt bekannten Anfangswert den Maximalbetrag berechnen, der nach Formel (21) bis (24) bei einer Exposition während der Maximalaktivierungsdauer erreicht worden wäre.

Eine Durchrechnung der ganzen oben gegebenen Analyse auf Maximalaktivität führt dann zu folgendem Resultat: Setzt man die Aktivität der auf dem negativ geladenen Draht abgesetzten Radiumzerfallsprodukte $= 100,0$ so ist die Aktivität der Thoriumzerfallsprodukte $= 24,3$, die der Aktiniumzerfallsprodukte $= 2,0$ zu setzen.

In gleicher Weise ist nun das gesamte vorliegende Beobachtungsmaterial analysiert und auf Maximalaktivitäten umgerechnet worden. Als Hauptresultat bei unserer speziellen Versuchsanordnung wurde dann erhalten: Setzt man den Durchschnittswert der auf einem negativ geladenen Draht aus der Atmosphäre sich ansammelnden Radiumzerfallsprodukte $= 100,0$ so hat man die Thoriumzerfallsprodukte $= 24,2$, die der Aktiniumzerfallsprodukte $= 3,2$ zu setzen.

Man sieht einmal daraus, welche wichtige Rolle die Thoriumzerfallsprodukte in der ganzen Erscheinung spielen, zweitens, wie stark die Zerfallsprodukte der kurzlebigen Aktiniumemanation gegenüber den beiden anderen Komponenten zurücktreten. Nur eine in vorstehender Weise durchgeführte Analyse der Abklingungskurven vermochte daher ihre Gegenwart zu verraten.²⁾

Es wäre nun verfehlt, wollte man diese auf dem Draht gefundenen Verhältnisse ohne weiteres als die in der Atmosphäre ganz allgemein herrschenden Verhältnisse ansehen, wollte man sagen, die festen Zerfallsprodukte von Radium, Thorium, Aktinium beteiligen sich an der Ionisation der Atmosphäre im Verhältnis $100:24:3$. Die Form der Abklingungskurven und damit das Ergebnis der Analyse in Bezug auf die Größenverhältnisse der drei Komponenten ist nicht nur eine Funktion der Expositionszeit, sondern auch der Expositionsspannung, der Spannung, die an den Draht während der Expositionszeit angelegt war. Ehe also an eine Diskussion der erhaltenen Resultate im Zusammenhang mit anderen Daten und namentlich an eine Anwendung auf das Gebiet der Lufterlektrizität herangetreten werden kann, ist zunächst dieser bisher gänzlich vernachlässigte Faktor zu untersuchen.

2. Wirkungen einer Variation der Expositionsspannung.

a) Auf die absolute Menge abgeschiedener Substanz.

Bei den Versuchen, die nach der von Elster und Geitel angegebenen Methode unternommen wurden, ist anfangs mit der Voraussetzung gearbeitet worden,³⁾ daß man von der Höhe der an den Draht anzulegenden Spannung unabhängig sei, sobald man etwa

¹⁾ Vgl. H. W. Schmidt, a. a. O., S. 661; denn das hier benutzte Elektrometer ist von der gleichen Art und den gleichen Dimensionen wie das von H. W. Schmidt in dieser Arbeit benutzte Instrument. Ich konnte daher unmittelbar seine Eichwerte benutzen, für die auch in der zitierten Arbeit die Methode der Gewinnung gegeben ist.

²⁾ Vermutet wurde sie bereits von Jaufmann (l. c.).

³⁾ Elster und Geitel, Phys. Zeitschr. 4, 96, 1902.

— 2500 Volt nehme; d. h. bei der Spannung — 2500 Volt müßte ein Grenzzustand erreicht sein.

Einmal läßt sich experimentell zeigen, daß dies in Strenge nicht zutrifft; weiter ist ein derartiger Grenzzustand unverständlich, wenn man sich den Vorgang der Aktivierung eines Drahtes in freier Atmosphäre klar macht. Die Substanzen lassen sich nur deshalb auf dem Draht nieder, weil ihnen eine spezifische Wanderungsgeschwindigkeit eigen ist; d. h. die Stoffe erhalten in einem elektrischen Felde die Fähigkeit, in der Richtung der Kraftlinien zu wandern. Diese Geschwindigkeit wird um so größer, je stärker das Feld, d. h. je höher die Spannung des Aktivierungsdrahtes gewählt ist. Dann wird auch der Luftbereich, der Luftzylinder, aus dem die Stoffe nach dem axial verlaufenden Draht hinwandern, um so größer, je höher die Spannung. Und da wir in freier Atmosphäre, nicht in einem begrenzten Raum arbeiten, so wird die Erscheinung des Sättigungsstromes, also eines Grenzzustandes, niemals eintreten können.

Experimentell ließ sich das in doppelter Weise zeigen. Die Spannung wurde variiert von 0 bis — 4600 Volt. Tab. 3 und Fig. 10 (auf Taf. IV) geben die Resultate.

Tabelle 3.

Spannung	Aktivität
— 100 Volt	43,7
— 200 "	64,3
— 600 "	95,1
— 1200 "	488,8
— 3000 "	919,7
— 4000 "	1140,4
— 4600 "	1321,8

Als Abzisse ist eingetragen die Spannung, als Ordinate die angesammelte Substanzmenge. Der Zustand der Sättigung ist nicht erreicht, der Punkt — 2500 Volt ist also in keiner Weise als Grenzpunkt berechtigt.

Natürlich sind die hier verwendeten Kurvenwerte für eine bestimmte Spannung Mittelwerte aus einer größeren Zahl von Aufnahmen. Die einzelnen Aufnahmen sind sehr großen Schwankungen infolge der sonstigen Verhältnisse in der Atmosphäre unterworfen. Um von diesen Schwankungen unabhängig zu sein, also zu gleicher Zeit an derselben Stelle Aufnahmen bei verschiedener Spannung machen zu können, wurden dann die Drähte im Erdfeld aktiviert und zwar in senkrechter Stellung. Fig. 11 gibt die ungefähre Störung der Potentialflächen durch einen unten geerdeten, senkrecht stehenden Draht.¹⁾ Da die Potentialflächen nach der Spitze des Drahtes hin stark zusammengedrängt werden, so ergibt sich eine Zunahme des Potentialgradienten, des Potentialgefälles längs des Drahtes von unten nach oben. Da jedem der radioaktiven Zerfallsprodukte eine spezifische Wanderungs-

¹⁾ Man könnte natürlich diese Störung nach einer Arbeit von Benndorf (Wien. Ber. 115, IIa, 425, 1906) genau konstruieren; uns kommt es aber hier nur auf die aus der Störung resultierende Kraftlinienrichtung an.

geschwindigkeit zukommt, so erhalten sie in einem elektrischen Felde eine dieser Konstanten entsprechende Geschwindigkeit. Es verhält sich also der Draht in seinen einzelnen Teilen diesen Substanzen gegenüber von unten nach oben wie eine Aufeinanderfolge von verschiedenen hochgeladenen Drähten. Wegen der Richtung des normalen Erdfeldes repräsentiert der Draht einen negativ geladenen Körper, dessen Ladung von unten nach oben zunimmt. Erdet man den Draht unten nicht, so verhält sich schon allein durch die Influenzwirkung der negativ geladenen Erde der Draht wie ein Körper, dessen negative Ladung nach der Spitze hin zunimmt. Tab. 4 gibt Resultate aus dieser Untersuchungsreihe. Es ist immer die Aktivität im untersten Teil = 1 gesetzt. Der Einfluß der speziellen

Tabelle 4.

a) Untersuchung des Drahtes in 2 Teilen			
Aktivierungsdauer	Aktivität der unteren Hälfte	Aktivität der oberen Hälfte	Befestigungsart
32 ^h	1	8,3	Unten isoliert
42 ^{1/4} ^h	1	5,9	Unten isoliert
47 ^h	1	6,2	Unten geerdet

b) Untersuchung des Drahtes in 3 Teilen				
Aktivierungsdauer	Aktivität des unteren Drittels	Aktivität des mittleren Drittels	Aktivität des oberen Drittels	Befestigungsart
60 ^h	1	3,9	12,0	Unten isoliert
209 ^h	1	5,0	8,4	Unten geerdet

Einordnung des Drahtes, die aus der letzten Rubrik hervorgeht, soll später bei einem zweiten hier beobachteten Effekt besprochen werden. Die Untersuchung wurde in der Weise geführt, daß der Draht beim Einholen an vorher bezeichneten Stellen abgeteilt, jeder Teil auf ein besonderes Gestell gewickelt und untersucht wurde.

Da es denkbar wäre, daß infolge der Aufwärtsbewegung der Luftströmungen die höher gelegenen Schichten der Atmosphäre reicher an radioaktiven Stoffen sind, so wurden auch Drähte, die bei hoher Spannung aktiviert waren, in ihren verschiedenen Teilen gesondert untersucht. Tab. 5 zeigt, daß der Effekt des Anstiegs von unten nach oben lange nicht in dem Maße auftritt wie bei ungeladenen Drähten. Eine geringe Steigerung mit der Höhe ist selbst bei dem auf — 4600 Volt geladenen Draht zu bemerken. Die Steigerung hat ihre Ursache eben darin, daß sich dem durch Anlegen der Spannung dem Draht aufgezwungenen elektrischen Felde die Wirkung des Erdfeldes überlagert. Auf diese Verhältnisse kommen wir später noch eingehender zu sprechen.

Tabelle 5.

Spannung	Aktivität		
	Untere Hälfte	Obere Hälfte	
— 100 Volt	1	3,45	
— 100 "	1	3,24	
— 100 "	1	1,45	
— 3000 "	1	1,06	
— 4000 "	1	1,05	
— 4600 "	1 (unteres Drittel)	1,08 (mittleres Drittel)	1,16 (oberes Drittel)

Wir können also sagen, daß für die Menge der auf einem Draht sich ablagernden radioaktiven Substanzen außer dem Gehalt der Luft an solchen Stoffen die Versuchsanordnung, d. h. hier, die Höhe der angelegten Spannung der maßgebende Faktor ist.

b) Wirkung einer Variation der Expositionsspannung auf das Verhältnis Radium: Thorium: Aktinium.

Wichtiger als dieses Ergebnis ist die Frage nach der Abhängigkeit der Kurvenform für die Abklingung von der Versuchsanordnung, also von der bei der Ansammlung angewandten Spannung. Es läßt sich nämlich zeigen, daß auch das Verhältnis der Aktivitäten der drei Komponenten, Radium, Thorium, Aktinium, — und das ist doch eben das, was immer gemessen wird — in weitem Maße lediglich wiederum eine Funktion der bei der Aktivierung des Drahtes angewandten Spannung ist.

Betrachten wir unsere bei der Variation der Expositionsspannung erhaltenen Resultate, so fällt ohne weiteres folgendes auf: Trotz intensiver Schwankungen in den einzelnen Verhältnissen wurde der höchste Anteil an Thor im Vergleich zu Radium gefunden bei der niedrigsten unter den angewandten Spannungen: nämlich 62,4 Teile Thorium und 100 Teile Radium, Thoriumaktivität also 62,4% der Radiumaktivität; der geringste Anteil an Thor im Vergleich zu Radium bei der höchsten unter den angewandten Spannungen: nämlich 2,6 Teile Thorium und 100 Teile Radium, Thoraktivität also 2,6% der Radiumaktivität. — Daß hier meteorologische und sonstige Verhältnisse in der Atmosphäre, die natürlich mitspielen können, nicht die ausschlaggebende Ursache sind, läßt sich experimentell einwandfrei zeigen, sobald der Grund des ganzen Effektes erkannt ist.

Die Aktivierung des Drahtes hat, wie schon mehrfach erwähnt, ihren Grund in der Eigenschaft der radioaktiven Zerfallsprodukte, daß sie durch eine für jedes Produkt besondere spezifische Geschwindigkeit ausgezeichnet sind, ausgedrückt in cm/sec für ein Feld mit 1 Volt/cm Gefälle. Das Verhältnis, in dem sich zwei vorhandene radioaktive Substanzen auf dem Draht niederlassen, ist also nur dann unabhängig von der Höhe der angelegten Spannung, wenn die beiden Substanzen gleiche spezifische Geschwindigkeit haben. Kommt jedoch beiden Substanzen eine verschiedene spezifische Geschwindigkeit zu, so verschiebt sich bei einer Steigerung der Spannung das Verhältnis zugunsten der leichter beweglichen Substanz; d. h. die Substanz mit der geringeren spezifischen Geschwindigkeit tritt im Verhältnis zu der leichter beweglichen immer mehr zurück. Bei

einer Abnahme der Spannung vollzieht sich dementsprechend das umgekehrte: die schwerer bewegliche Substanz tritt stärker hervor, das Verhältnis der abgelagerten Mengen verschiebt sich zu Ungunsten der Substanz mit der größeren spezifischen Geschwindigkeit. Wir haben hier einen analogen Fall zu der bereits behandelten Erscheinung einer Variation der Unipolarität bei zwei Ionenarten von verschiedener Beweglichkeit:¹⁾ Die Unipolarität, das Hervortreten der einen Ionenart vor die andere, wird um so größer, je stärker das gewählte Feld, um so geringer, je schwächer das gewählte Feld. Ein erreichbarer Grenzzustand ist hier bedingt durch das Verhältnis der Beweglichkeiten der beiden Ionenarten.

Nun kann man von vornherein als wahrscheinlich annehmen, daß den verschiedenen radioaktiven Zerfallsprodukten, vor allem den Radium- und Thor-niederschlägen (die geringe Aktiniummenge wollen wir als zum Radiumtypus gehörend ansehen), im elektrischen Felde nicht gleiche Geschwindigkeiten zukommen, da sie sich in allen übrigen Eigenschaften, Lebensdauer, Art der ausgesandten Strahlen, stark unterscheiden. Nehmen wir einmal an, die Thorzerfallsprodukte hätten eine geringere Beweglichkeit, eine geringere spezifische Geschwindigkeit, als die Radiumzerfallsprodukte. Dann würde aus obigem folgen, daß das Verhältnis der Radium- und Thoraktivitäten auf einem aktivierten Draht eine Funktion der angelegten Spannung ist, derart, daß die Thoraktivität im Vergleich mit der Radiumaktivität zurücktritt bei einer Steigerung der Spannung, daß sie aber mehr und mehr hervortritt bei einer Erniedrigung der Spannung. Zu beachten ist, daß selbstverständlich die absolute Menge abgelagerter Substanz für beide Stoffe steigt mit zunehmender Spannung, daß aber das Verhältnis beider Mengen zueinander in dem angegebenen Sinn sich mit variierender Spannung ändert.

Der experimentelle Nachweis läßt sich mit Hilfe der im Erdfeld senkrecht gespannten Drähte führen, die ohne künstliche Spannung aktiviert wurden. Zu erwarten ist nach den obigen Überlegungen, daß das Verhältnis von Thoriummenge zu Radium-

Tabelle 6.

Beispiel	a) Untersuchung in 2 Teilen	
	Verh. der Radiumaktivitäten	Verh. der Thoraktivitäten
1	1,0 : 7,8	1,0 : 2,6 ₅
2	1,0 : 7,2 ₄	1,0 : 3,8 ₁
	b) Untersuchung in 3 Teilen	
	Verh. der Radiumaktivitäten	Verh. der Thoraktivitäten
3	1,0 : 4,9 ₄ : 15,9	1,0 : 1,3 ₀ : 3,0 ₁
4	1,0 : 6,1 : 10,7	1,0 : 2,1 ₃ : 2,7

menge auf dem Drahte von unten nach oben sich stetig in dem Sinne ändert, daß die Thoriumaktivität mit der Höhe im Verhältnis zur Radiumaktivität kleiner wird, da das Potentialgefälle längs des Drahtes steigt. Tab. 6 zeigt das Resultat einer Reihe in dieser Weise vorgenommener Untersuchungen. Es ist jedesmal die Thor- und die Radium-

¹⁾ L. Heis, Phys. Zeitschr. 9, 620, 1908.

aktivität im untersten Teil des wieder in mehreren Teilen untersuchten Drahtes = 1 gesetzt. Die Tabelle zeigt klar das viel intensivere Ansteigen der Radiumaktivität mit der Höhe, woraus zunächst qualitativ zu schließen ist, daß den Radiumzerfallsprodukten im elektrischen Felde eine größere spezifische Geschwindigkeit zukommt als den Thoriumzerfallsprodukten.

Wegen des raschen Zerfalls der Thoremanation im Vergleich zu der des Radiums könnte freilich gerade diese Erscheinung ihre Ursache in einer rascheren Abnahme der Thoraktivität als der Radiumaktivität mit der Höhe haben. Tab. 7 gibt daher die Resul-

Tabelle 7.

Spannung	Verh. der Ra-aktivitäten auf verschiedenen Teilen	Verh. der Thoraktivitäten auf verschiedenen Teilen
— 3000 Volt	1,00 : 0,98	1,00 : 1,30
— 4000 „	1,00 : 1,00	1,00 : 1,20
— 4600 „	1,00 : 1,09 : 1,16	1,00 : 1,08 : 1,16 (3 Teile)

tate von Versuchen, bei denen dem Draht eine hohe negative Spannung aufgezwungen war. Es zeigt sich, daß nun der gesuchte Effekt in den verschiedenen Partien des Drahtes nicht auftritt, Radium und Thorium zeigen nahezu gleiche Mengenverhältnisse auf den verschiedenen Teilen.

Hieraus folgt also einmal, daß die Thoriumteilchen als schwerer beweglich anzusehen sind als die Radiumteilchen, zweitens, und das ist das wichtigste: Eine Angabe des Verhältnisses der Aktivitäten von Radium zu Thorium in der bisher üblichen Weise ist nicht gestattet. Dies Verhältnis ist eine Funktion der Spannung des zu aktivierenden Drahtes; die Thoriumaktivität tritt gegenüber der Radiumaktivität um so mehr zurück, je höher die Aktivierungsspannung gewählt wird.

Aus dem Beobachtungsmaterial anderer Forscher sei hier zunächst nur ein Beispiel angeführt, das den Punkt, worauf es ankommt, klar beleuchtet. Dadourian¹⁾ schließt, daß die Atmosphäre von Rom „jedenfalls“ viel reicher an Thoremanation sei, als die von New-Haven in Nordamerika, da in Rom²⁾ die aktivierten Drähte im Mittel 60%, in New-Haven nur 25% der Gesamtaktivität als Thoraktivität zeigten. Daß dieser Schluß nicht einwandfrei ist, erkennen wir sofort, wenn wir sehen, daß in Rom als Spannungsquelle eine Akkumulatorenbatterie von 500 Volt, in New-Haven eine Whimhurstmaschine mit 2 mm Funkenstrecke, also vielleicht 10000 Volt verwandt wurden. Daß sich beide Resultate, das aus Rom und das aus New-Haven, bei Berücksichtigung dieses Umstandes in genügende Übereinstimmung bringen lassen, werden wir später sehen. Jedenfalls genügen schon diese Zahlenangaben im Vergleich mit den oben erhaltenen Resultaten über die Beweglichkeit der Radium- und Thoriumteilchen, um zu zeigen, daß eine derartige Verschiebung des

¹⁾ H. M. Dadourian, Phys. Zeitschr. 9, 333—337, 1908.

²⁾ G. A. Blanc, Phys. Zeitschr. 9, 294—304, 1908.

Verhältnisses der Aktivitäten an zwei Orten mit tatsächlich gleichem Radium- und Thor-gehalt als Versuchsergebnis auftreten kann.¹⁾

Wieweit auch bei der Bestimmung des Verhältnisses der Radiumaktivität zur Aktiniumaktivität ein entsprechender Umstand maßgebend ist, ließ sich experimentell in der hier angegebenen Weise nicht feststellen wegen der geringen Aktiniummenge, die überhaupt abgeschieden wurde. Für die Kernfrage des Ganzen, auf die wir schließlich kommen wollen, die Bedeutung der gesamten Vorgänge für die Lufterlektrizität, ist dies wegen der untergeordneten Rolle, die das Aktinium darin spielt, ohne Wichtigkeit.

c) Das Verhältnis der spezifischen Geschwindigkeiten.

Ist der eben besprochene Umstand von Interesse schon bei der Deutung und damit der Analyse der Kurvenformen, die man für die Abklingung der an einem bestimmten Orte angesammelten radioaktiven Substanzen erhält, so ist er weiter natürlich von noch größerer Wichtigkeit, wenn man den Versuch macht, aus dem Verhältnis der auf dem Drahte angesammelten radioaktiven Substanzen einen Schluß zu ziehen auf das Verhältnis, in dem sich beide Substanzen in freier Atmosphäre an der Ionisation der Luft beteiligen, wenn man also zu ihrer Bedeutung für den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre übergehen will.

Hat man von einer radioaktiven Substanz die gerade zerfallenden Mengen in der Form der Formeln (1) S. 9 dargestellt, so erhält man lediglich durch Integration über $t = 0$ bis $t = \infty$ die gesamte vorhandene Menge. Sind nun zwei verschiedene radioaktive Substanzen, die durch die Radioaktivitätskonstanten λ und λ' charakterisiert seien, auf einem Draht während der Zeit t angesammelt worden, und hat sich dabei das Aktivitätsverhältnis $\frac{a}{a'}$ herausgebildet, so läßt sich, wie auch schon Blanc gezeigt hat,²⁾ das Verhältnis ihrer Ionisationswirkung in der freien Atmosphäre angeben als

$$(26) \quad \frac{I}{I'} = \frac{a}{a'} \cdot \frac{\lambda}{\lambda'} \cdot \frac{v'}{v} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda' t}}{1 - e^{-\lambda t}}.$$

Dabei ist $\frac{v}{v'}$ das Verhältnis der spezifischen Geschwindigkeiten der beiden Substanzen, z. B. der Radium- und Thorzerfallsprodukte, das man also kennen muß, wenn man von dem Verhältnis der gemessenen Aktivitäten $\frac{a}{a'}$ einen Schluß ziehen will auf das Verhältnis der Ionisationswirkung in der Atmosphäre.

Blanc hat sich bei einem Teil seiner Versuche eines Kunstgriffes bedient, wodurch er das Verhältnis $\frac{v}{v'}$ ausschaltete. Er traf die Versuchsanordnung so, daß er aus dem Luftvolumen, mit dem er arbeitete, alle radioaktive Substanz ausfällte.

¹⁾ Während der Niederschrift dieser Versuche weist F. A. Harvey (Phys. Zeitschr. 10, 45–48, 1909) auf die Möglichkeit der Deutung der Widersprüche in den Versuchen von Blanc und Dadourian in der hier bewiesenen Art hin.

²⁾ G. A. Blanc, Phys. Zeitschr. 9, 294–304, 1908.

In dem Bestreben, auch das Beobachtungsmaterial anderer Forscher noch zu retten und eine nachträgliche Reduktion zu ermöglichen, habe ich versucht $\frac{v}{v'}$, das Verhältnis der Beweglichkeiten der Radium- und Thorpartikelchen zu ermitteln. Es kann sich dabei nur um einen zwischen weiten Grenzen gültigen Mittelwert handeln, da sowohl den Radium- als auch den Thoriumpartikeln zumal in der freien Atmosphäre nicht je eine einheitliche bestimmte spezifische Geschwindigkeit zukommt; man kann hier nur von einem Durchschnittswert reden. Dies geht auch hervor aus den eingehenden Untersuchungen von Gerdien über die spezifische Geschwindigkeit der atmosphärischen Induktionen.¹⁾ Leider läßt sich gerade das hier wichtige Verhältnis der Durchschnittsgeschwindigkeiten der Radium- und Thorteilchen diesen eingehenden Beobachtungen nicht entnehmen. Die Aspirationsmethode lieferte nicht genügende Mengen von Thoriumniederschlägen, so daß nur angegeben werden konnte, daß die Thorinduktionen im allgemeinen geringere Geschwindigkeiten aufweisen als die Radiuminduktionen.

Wir wollen annehmen, daß in den 20 m, in denen der im Erdfeld zu aktivierende Draht ausgespannt ist, der Gehalt der Luft an radioaktiver Emanation vom Radiumtypus und auch vom Thortypus ein gleichmäßiger sei. Greifen wir Beispiel 1 aus Tab. 6, S. 31 heraus, so sehen wir, daß durch die Wirkung des sich von unten nach oben steigenden Potentialgefälles auf den beiden Hälften des Drahtes Radiummengen sich niedergelassen haben, die sich verhalten wie 1 : 7,8; die Thormengen verhalten sich wie 1 : 2,65. Daraus ergibt sich, daß die Steigerung des Potentialgefälles von der unteren zur oberen Hälfte auf die Thor- und Radiummengen im Verhältnis 1 : 2,94 eingewirkt hat; die Radiumteilchen werden 2,94 mal so rasch abgeschieden als die Thorteilchen. Das aber bedeutet: in diesem Spezialfall verhielten sich die spezifischen Geschwindigkeiten der Thor- und Radiumteilchen wie 1 : 2,94. Nimmt man den Mittelwert aus sämtlichen vorliegenden Versuchen, so erhält man als Verhältnis der Beweglichkeiten der Thor- und der Radiumzerfallsprodukte 1 : 2,92.

Dies Zahlenverhältnis macht selbstverständlich nicht Anspruch auf große Genauigkeit; es ist nur als ein Durchschnittsverhältnis aufzufassen, da sowohl unter den Radium- wie unter den Thorzerfallsprodukten Geschwindigkeiten vorkommen, die zwischen dem ein- und zehnfachen Betrag schwanken. Es soll lediglich gestatten, nach Formel (26), S. 33 eine Beziehung zwischen dem Verhältnis der Aktivitäten eines Drahtes und dem Verhältnis der in der Luft von den Substanzen bewirkten Ionisationen zu liefern. Dann aber gestattet es, aus dem Beobachtungsmaterial anderer Forscher noch nachträglich dasselbe Verhältnis der Beteiligung von Thor und Radium an der Ionisation der Atmosphäre festzustellen. Nachträglich richtig deuten läßt sich natürlich nur Versuchsmaterial, bei dem die Versuchsbedingungen, z. B. auch die Aktivierungszeit, angegeben sind.

Nach früheren Überlegungen (Formeln (21) bis (24)) wurde bei dem Beobachtungsmaterial anderer Forscher zunächst das nur für die betreffende Aktivierungszeit gültige Verhältnis der Aktivitäten auf das bei Einhaltung der maximalen Aktivierungsdauer erreichbare Verhältnis umgerechnet. Dies Verhältnis wurde dann mit Hilfe des von uns gefundenen Durchschnittswertes für das Verhältnis der Beweglichkeiten beider Substanzen auf

¹⁾ H. Gerdien, Abh. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Neue Folge 5, Nr. 5, 1907.

das Verhältnis der Ionisationswirkungen in der Atmosphäre reduziert. Die Beobachtungen zeigen, daß an den verschiedenen Orten der Erde, an denen seither solche Beobachtungen vorgenommen sind, keine wesentlichen Unterschiede in diesem Verhältnis bestehen, und daß wir zweitens auf diese Weise Übereinstimmungen erhalten mit Untersuchungen, die dies Verhältnis in anderer Weise direkt ermittelt haben:

1. a) Blanc findet in Rom¹⁾ nach einer Methode, die unabhängig von dem Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten ist, daß die Ionisation durch die Produkte vom Thoriumtypus bei drei Versuchen 4,7%, 6,7%, 7,2%, im Mittel also 6,2% der durch die radioaktiven Stoffe bewirkten Gesamtionisation ausmacht.

b) Bei der Aktivierung von Drähten findet Blanc 40—75% des Niederschlags als Thorprodukte. Das liefert nach unserer Umrechnung im Mittel für die Ionisationswirkung des Thor: 10,8%, für den unteren Grenzwert 5,6%, für den oberen 22,7%. Die Übereinstimmung zwischen den so aufeinander reduzierten Beobachtungen a und b ist genügend, wenn man bedenkt, welchen Schwankungen das Verhältnis der Beweglichkeiten unterworfen ist.

2. Dadourian findet in New-Haven in Nordamerika,²⁾ daß 20—30% der Anfangsaktivität vom Thoriumtypus ist. Dies liefert als unteren Grenzwert 2,1% Thorionisation, als oberen Grenzwert 3,7%.

3. a) Jauffmann³⁾ findet bei zweistündiger Exposition 6% Thoraktivität, das liefert 4,4% Thorionisation.

b) Eine achtestündige Exposition mit 17% Thoraktivität auf dem Draht liefert 4,5% Thorionisation. — Die beiden Versuche von Jauffmann, die auf der Zugspitze angestellt sind, geben gut übereinstimmende Werte mit 4,45% der Gesamtionisation als Thorwirkung.

4. Bumstead⁴⁾ findet

a) bei dreistündiger Exposition 3—5% Thoraktivität; dies führt zu 2,12% Thorionisation,

b) bei zwölfstündiger Exposition 15% Thoraktivität, was zu 2,89% Thorionisation führt.

5. a) Gockel⁵⁾ erhält auf dem Brienzer Rothorn bei Aktivierung ohne Spannung und bei heftigem Graupel- und Schneefall 50% Thoraktivität; das gibt 9,6% Thorionisation. Die Aktivierungsdauer war hier 29 Stunden.

b) In Freiburg in der Schweiz werden bei zwölfstündiger Exposition und unter Anwendung einer Spannung von — 2000 Volt Thoraktivitäten von 20—60% gefunden. Der untere Grenzwert liefert 4,04% Thorionisation, der obere 20,1%, der Mittelwert 5,6%. Unterer und oberer Grenzwert sind also bei Blanc und bei Gockel ungefähr gleich. Gockel findet etwas geringere Thorwirkung, da er höhere Spannung anwendet.

¹⁾ G. A. Blanc, a. a. O.

²⁾ H. M. Dadourian, a. a. O.

³⁾ J. Jauffmann, a. a. O.

⁴⁾ Bumstead, Sill. Journ. 18, 1, 1904.

⁵⁾ A. Gockel, Phys. Zeitschr. 8, 701, 1907.

6. Das Mittel aus meinen zahlreichen in Gießen in Oberhessen angestellten Versuchen ist 2,2% Thorionisation, ein Wert, der namentlich gut mit den Werten Dadourians in New-Haven in Nordamerika übereinstimmt.

7. Gerdien¹⁾ beobachtet nach einer durchaus anderen Methode, bei direkter Messung, in Göttingen, als Verhältnis der Ionisationswirkungen von Ra und Th in der freien Atmosphäre in drei Fällen

1. Th = 9,17% der Gesamtionisation,
2. Th = 16,0% „ „
3. Th = 20,2% „ „

Werte, die sich den in obiger Weise reduzierten Beobachtungen gut einordnen.

Diese Zusammenstellungen zeigen einmal, daß es in dieser Weise nun möglich ist, das an verschiedenen Stellen der Erde unter verschiedenen Versuchsbedingungen gewonnene Beobachtungsmaterial noch nachträglich zu vergleichen, zweitens, daß sich die Schwankungen in den Extremwerten an den verschiedenen Orten innerhalb derselben Grenzen bewegen, daß also das Verhältnis, in dem Thorzerfallsprodukte und Radiumzerfallsprodukte sich an der Ionisation der Atmosphäre beteiligen, an den in zum Teil in verschiedenen Erdteilen liegenden Beobachtungsorten nicht wesentlich verschieden ist. Das Mittel aus den vorliegenden Messungen gibt etwa 1:13.

Betont sei hier nochmals, daß ja selbst bei Kenntnis der Aktivierungsdauer und auch der Wanderungsgeschwindigkeit der Thor- und Radiumteilchen sich zwei Beobachtungen nur dann direkt miteinander vergleichen lassen, wenn die Aufnahmen bei gleicher Aktivierungsspannung angestellt sind. Eine Verschiebung des Verhältnisses beider Aktivitäten tritt immer ein, wenn man die Spannung verändert.

d) Die Einwirkung des Erdfeldes.

Bei der Variation der an den zu aktivierenden Draht angelegten Spannung spielt der Fall der Spannung 0, d. h. die Aktivierung des Drahtes im natürlichen Felde der Erde eine besondere Rolle, wie die oben mitgeteilten Resultate gezeigt haben. Da das Erdfeld nicht nur bei dem ungeladenen sondern auch bei dem negativ geladenen und, worauf es uns hier noch besonders ankommen muß, bei dem positiv geladenen Draht seine Einwirkung ausübt, so ist es von Wichtigkeit, auf diese Verhältnisse genauer einzugehen.

Wir wollen allen Betrachtungen den normalen Fall des Erdfeldes zugrunde legen: Das Potential steigt von der Erde aus nach oben im positiven Sinne an; das Potentialgefälle soll den normalen Betrag von rund 100 Volt pro m haben. Die Länge des zu aktivierenden Drahtes betrage 20 m. Der Draht soll sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Lage aktiviert werden. Für die Richtung, in der die radioaktiven Stoffe im wesentlichen wandern, ist die Richtung der Kraftlinien maßgebend, da die Substanzen nach der Kathode wandern. In der figürlichen Darstellung der Verhältnisse wird daher die Richtung der Kraftlinien in bezug auf den Draht Aufschluß geben können über etwaige verschiedene Aktivierungen der einzelnen Drahtteile.

¹⁾ H. Gerdien, a. a. O.

a) Die Einwirkung des Erdfeldes auf einen ungeladenen Draht.

Die beiden Hauptfälle, die für den senkrecht stehenden ungeladenen Draht vorliegen können, sind durch Fig. 11 und Fig. 12 gegeben: Der Draht kann geerdet oder isoliert sein. Fig. 11 gibt die Störung der Potentialflächen für den geerdeten, Fig. 12 die für den isolierten Draht. Die Richtung der Kraftlinien zeigt sofort, daß in beiden Fällen eine Aktivierung des Drahtes eintreten muß, daß aber auch in beiden Fällen die oberen Partien des Drahtes sich stärker aktivieren als die unteren. Auch die Unterschiede sind ohne weiteres klar: Bei dem isolierten Draht sind für den oberen und unteren Teil die Kraftlinien in bezug auf den Draht direkt entgegengesetzt gerichtet. Daraus folgt, daß die Unterschiede in der Aktivierung zwischen oben und unten beim isolierten Draht stärker ausgeprägt sein müssen als beim geerdeten. Dasselbe lehrt Tab. 4, S. 29. Zweitens: Da es sich in beiden Fällen um dasselbe elektrische Feld, das Feld der Erde, handelt, so ist bei dem geerdeten Draht das Potentialgefälle größer am oberen Ende als bei dem isolierten Draht. In letzterem Falle ist oben eine geringere Zahl von Potentiallinien an der betreffenden Stelle zusammengedrängt. Außerdem gehen die Kraftlinien beim unteren Teil des isolierten Drahtes von diesem weg. Die experimentelle Bestätigung müßte eine größere Durchschnittsaktivität des geerdeten Drahtes liefern und zwar sowohl des ganzen Drahtes als auch namentlich des oberen Teils. Das zeigt klar Tab. 8, S. 37, in der die Aktivitäten von Drähten angegeben sind, von denen 1 und 2, 3 und 4 bei ungefähr gleicher Wetterlage aktiviert wurden. Auch die Abhängigkeit der Unterschiede zwischen oben und unten von der Befestigungsart ist ohne weiteres ersichtlich.

Tabelle 8.

Draht	Aufstellung	Anzahl der Teile	Aktivität der Teile von unten nach oben	Gesamtaktivität
1	geerdet	2	7,7; 47,8	55,5
2	isoliert	2	1,9; 10,3	12,2
3	geerdet	3	10,3; 49,0; 86,9	146,2
4	isoliert	3	4,1; 19,8; 61,6	85,5

Nach diesen Auseinandersetzungen sind Fig. 13 und Fig. 14 ohne weiteres verständlich. Sie geben die Verhältnisse auf einem 10 m über dem Erdboden horizontal ausgespannten Drahte, Fig. 13 auf einem geerdeten, Fig. 14 auf einem isolierten.

Der Verlauf der Kraftlinien zeigt wieder, daß in beiden Fällen eine Aktivierung des Drahtes eintritt, die beim geerdeten Draht wieder größer ist als beim isolierten und zwar wegen der größeren Zahl der zusammengedrängten Potentialflächen. Für die Ablagerung der Substanzen selber wird man sagen können, daß sie sich in größerer Menge an der von der Erde weggewandten Seite ansetzen werden.

β) Die Einwirkung des Erdfeldes auf einen negativ geladenen Draht.

Einfach liegen die Störungsverhältnisse der Potentialflächen bei normalem Erdfeld für den negativ geladenen Draht. Fig. 15 und 16 geben den Verlauf für einen senkrechten und einen horizontalen, beliebig hoch negativ geladenen Draht. Die Wirkung des

Erdfeldes überlagert sich hier einfach der Wirkung des aufgezwungenen künstlichen Feldes. Die Richtung der Kraftlinien, Entfernung der einzelnen Potentialflächen voneinander und vom Draht und die aus beidem resultierende Wanderung der radioaktiven Partikel nach den verschiedenen Teilen des Drahtes sagt also: Ein senkrecht im Erdfeld stehender, auf beliebig hoher negativer Spannung gehaltener Draht muß stets in seinen oberen Partien eine etwas stärkere Aktivität erhalten als in seinen unteren. Die Unterschiede sind selbstverständlich nicht groß und abhängig von der Höhe der angelegten negativen Spannung. Tab. 5, S. 30 zeigt die experimentelle Bestätigung. — Ein horizontal im Erdfeld stehender, auf beliebig hoher negativer Spannung gehaltener Draht muß an seinen beiden Enden gleichermaßen eine etwas höhere spezifische Aktivität annehmen als in der Mitte.

γ) Die Einwirkung des Erdfeldes auf einen positiv geladenen Draht.

Eine interessante Tatsache liefert noch die Untersuchung der Einwirkung des Erdfeldes auf einen positiv geladenen Draht. Fig. 17—22 geben den Verlauf der Potentialflächen und der Kraftlinien für die verschiedenen möglichen Fälle: Vertikale und horizontale Aufstellung, Spannung unter, gleich oder über dem durch Länge und Aufstellung des Drahtes an bevorzugte Stelle gerückten Potentials im Erdfeld: Der Draht zieht die Potentialfläche des Erdfeldes in sich hinein, die der ihm künstlich aufgezwungenen positiven Spannung entspricht. Damit sind die in Fig. 17—22 gegebenen Grundtypen wieder ohne weiteres verständlich.

1. Trotz der Verschiedenheit der Bilder sagen die Fig. 17—19 in gleicher Weise: Oberer und unterer Teil des Drahtes verhalten sich den radioaktiven Stoffen gegenüber verschieden im elektrischen Feld der Erde. Aus Fig. 20—22 folgt: Die von der Erde abgewandte und die der Erde zugewandte Seite des Drahtes verhalten sich verschieden.

2. Jeder positiv geladene Draht, der senkrecht im Erdfeld steht, muß unter der Wirkung des Erdfeldes eine Aktivität annehmen, da er sich bei beliebiger Höhe des künstlichen Potentials in seinem oberen Teil immer gegenüber der Umgebung als Kathode verhält, so daß radioaktive Stoffe von gleicher Art nach ihm hinwandern wie nach einem negativ geladenen Draht.

3. Jeder positiv geladene Draht, der horizontal im Erdfeld steht, verhält sich bei beliebig hoher Spannung an der von der Erde abgewandten Seite der Umgebung gegenüber als Kathode.

Das wirft ein Licht auf die Tatsache der Ansammlung von radioaktiven Stoffen auf positiv geladenen Drähten im Erdfeld. Ich aktivierte rasch hintereinander, an derselben Stelle natürlich, zwei Drähte, den einen bei + 3000 Volt Spannung, den zweiten bei — 3000 Volt. Die Aktivität des ersten betrug 8% der Aktivität des zweiten. Von derselben Größenordnung sind auch die von anderer Seite festgestellten Aktivierungen in der Atmosphäre bei positiver Ladung des Drahtes.¹⁾ Bildet man nun weiter das Mittel aus meinen sämtlichen ohne angelegte Spannung, also lediglich im Erdfelde erzielten Aktivitäten, und das Mittel aus den bei negativer Ladung des Drahtes erzielten, so ergibt sich: Durch Aktivierung im Erdfeld erhält man im Mittel 7,9% der Aktivität, die man im Mittel bei negativer Ladung des Drahtes zwischen 0 und — 5000 Volt erzielen kann.

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. Zeitschr. 4, 97, 1902.

Die Übereinstimmung der beiden bei positiver Spannung und bei der Spannung 0 erhaltenen Werte ist auffallend und sagt: Bei der Aktivierung von Drähten durch positive Ladung ist die Anwesenheit des Erdfeldes von grundlegender Bedeutung. Man kann nicht ohne weiteres schließen, daß die bei positiver Ladung des Drahtes erhältliche Aktivität von negativ geladenen Zerfallsprodukten radioaktiver Stoffe allein herrührt. Es werden sich selbstverständlich auch negativ geladene Zerfallsprodukte auf dem positiv geladenen Draht absetzen, wenn solche existieren. Jedenfalls setzen sich aber auf einem positiv geladenen Draht dieselben Zerfallsprodukte ab, die den radioaktiven Niederschlag auf negativ geladenen Körpern bilden. Der Betrag der Aktivität ist von derselben Größe wie bei ungeladenen Drähten, die im Erdfeld aktiviert werden.

δ) Die Einwirkung des Erdfeldes auf die Leitfähigkeit in unmittelbarer Nähe des Drahtes.

Die eigentümlichen Verhältnisse des Erdfeldes in der Nähe dieser geladenen oder ungeladenen Drähte, die also eine Ablagerung von radioaktiven Stoffen auf Gebilden bewirken, welche eine Änderung der Potentialflächen hervorbringen, führt zu einer Frage, die hier nur kurz behandelt werden soll: Wie weit wird nun auch die Leitfähigkeit der Atmosphäre in der unmittelbaren Nähe von solchen linienförmigen Gebilden geändert, wenn eine Ablagerung von radioaktiven Substanzen auf ihnen und damit eine abnorme Ionisation der Luft in ihrer unmittelbaren Nähe statthat?

Bei einem dauernd senkrecht im Erdfeld stehenden, unten geerdeten Leiter — natürlich gelten entsprechende Überlegungen auch für einen horizontalen geerdeten Leiter — wird offenbar bald ein stationärer Zustand durch Ablagerung radioaktiver Substanzen herbeigeführt, der sich in folgender Weise charakterisieren läßt: Nach einer gewissen Zeit, die sich in früher gegebener Weise berechnen läßt, hat sich auf dem Draht bei dem herrschenden Gehalt der Luft an radioaktiven Stoffen radioaktives Gleichgewicht eingestellt, so daß in der Zeiteinheit durch Zerfall ebensoviel radioaktive Substanz verschwindet, als durch Ablagerung neu hinzukommt. Nehmen wir nun die Reichweite der α -Strahlen dieser Stoffe im Mittel zu 5 cm an, so ist der Draht die Längsachse eines Zylinders von 5 cm Radius, in dem eine erhöhte Ionenbildung stattfindet. Diese Ionenbildung steigt gemäß der Menge der auf dem Draht befindlichen Substanzen von unten nach oben an und hat ihre Maximalstelle an der Spitze des Drahtes. Der Zylinder ist nach außen hin scharf abgegrenzt wegen der die α -Strahlen charakterisierenden Reichweite. Um den Draht herum befindet sich also eine Zone von 5 cm Radius, in der die Leitfähigkeit wegen der erhöhten Ionenbildung größer ist, als weiter draußen in der Atmosphäre. Von der Diffusion der Ionen aus diesem Bereich nach außen wollen wir zunächst einmal absehen. Das Charakteristische ist dann, daß die Leitfähigkeit in dieser Zone gerade um einen durch das radioaktive Gleichgewicht auf dem Draht festgelegten Betrag erhöht ist, und daß sie fast momentan auf den normalen Wert der freien Atmosphäre herabsinkt, sobald man die durch die Reichweite der α -Strahlen gegebene Grenze überschreitet.

Bei unseren Versuchen wurde die radioaktive Substanz nun in den Zerstreungsraum eines Elektrometers gebracht und ihre Ionisierungsfähigkeit bestimmt. Berechnet man sich nun erstens das Luftvolumen, das die Strahlen in dem Zerstreungsraum des Elektrometers

ionisieren müssen und daraus die Ionenzahl, die sie in der Zeiteinheit im cm^3 zu bilden vermögen, berechnet man zweitens den Raum, den sie ionisieren müssen, wenn sie sich im Freien auf dem Draht befinden, nimmt man drittens an, daß die natürliche Leitfähigkeit der Luft im Zerstreuungsgefäß sich nicht wesentlich von der Leitfähigkeit der freien Atmosphäre unterscheidet, so ergibt eine Überschlagsrechnung, daß in der dem Draht unmittelbar anliegenden Luftschicht die Leitfähigkeit ca. 20%—25% größer ist, als weiter draußen. Dieser Wert gilt für die oberen Partien eines etwa 20 m langen Drahtes und nimmt von oben nach unten ab.

Stangenartige (linienförmige) geerdete Leiter, die im Erdfelde radioaktive Substanzen auf sich ansammeln, haben um sich herum eine Luftschicht in Gestalt eines Zylinders mit einem Radius gleich der Reichweite der α -Strahlen, in der die Leitfähigkeit größer ist als in der freien Atmosphäre. Diese Erhöhung der Leitfähigkeit nimmt längs des Drahtes mit der Höhe zu und beträgt bei einem 20 m langen Draht in den obersten Partien 20—25%.

Ein dauernd positiv oder negativ geladener Draht zeigt natürlich dieselbe Erscheinung, wie aus der Deformation des Erdfeldes gemäß Fig. 15—22 hervorgeht. Bei einem dauernd negativ geladenen Draht nimmt natürlich diese Erhöhung je nach der Höhe der angelegten Spannung leicht ganz andere Beträge an. Sie kann beispielsweise schon bei — 3000 Volt etwa 250% betragen. — Ein weiteres Eingehen auf diese Frage wäre hier nicht am Platze; sie kann aber in der Funkentelegraphie möglicherweise eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen.

Bemerkungen: Zum Abschluß dieses ersten Teiles der Arbeit sei noch kurz auf zwei Beobachtungen aufmerksam gemacht; die Verhältnisse scheinen mir noch nicht genügend geklärt, als daß etwas allgemein Gültiges darüber gesagt werden könnte.

1. Bei der Bestimmung des Verhältnisses der Wanderungsgeschwindigkeiten der Radium- und Thorteilchen aus dem Verhältnis der Aktivitäten auf verschiedenen Teilen des Drahtes ist zu sehen, daß scheinbar dies Verhältnis mit wachsender Höhe etwas steigt. Der Grund kann ja tatsächlich darin liegen, daß in größerer Höhe die Geschwindigkeit der Thorpartikel wegen der größeren Möglichkeit der Molisierung auf dem Weg vom Boden zur Höhe im Durchschnitt etwas geringer ist; wahrscheinlicher aber ist, daß bereits in dieser Höhe (etwa 20 m) der Gehalt an Thoriumzerfallsprodukten etwas geringer ist als am Erdboden und zwar wegen der großen Zerfallsgeschwindigkeit der Thoremation. Drähte, die auf dem Turm horizontal ausgespannt waren, zeigten auch tatsächlich nur eine geringe Thoraktivität. Die Zahl der Versuche erscheint mir aber nicht ausreichend zur Entscheidung der wichtigen Frage nach der raschen Abnahme der Thoraktivität mit der Höhe. Groß ist die Abnahme auf keinen Fall. Das ergibt sich aus den zahlreichen Untersuchungen der verschiedenen Teile eines bei hoher Spannung aktivierten Drahtes.

2. Bei einer Reihe von Beispielen zeigt sich nach einer Abklingungszeit von etwa 15 Minuten ein intensiver Anstieg der Kurve (vgl. Fig. 23), der sich nicht aus der Abklingung der in Betracht kommenden Stoffe ohne weiteres erklären läßt. Dasselbe habe ich bereits bei früher veröffentlichten Untersuchungen¹⁾ von Hüllen beobachtet, die die

¹⁾ K. Kurz, Phys. Zeitschr. 7, 771, 1906. Ber. d. D. Phys. Ges. 4, 459, 1906. Dissertation, Gießen 1907.

negativ geladenen Zerstreuungskörper von Apparaten für luftelektrische Messungen umgeben hatten. Die entsprechende Erscheinung ist unterdessen auch von Gerdien¹⁾ beobachtet worden. Da die Erscheinung ausblieb, als die Aufwickleinrichtung für den einzuholenden Draht so umgeändert war, daß nur noch geringe Erschütterungen beim Aufwickeln vorkamen, so ist der Grund vielleicht im Verhalten dieser aufgelagerten Produkte gegen äußere Störungen zu suchen. Stephan Meyer hatte bei der Diskussion über obige Versuche darauf hingewiesen,²⁾ daß Ra C ein spröder Körper sei, der bei Erschütterungen von seiner Unterlage abspringe. Ein Neuentstehen des strahlenden Ra C aus dem ihm gegenüber strahlenlosen Ra B könnte wohl ein Wiederansteigen der Kurve zur Folge haben, sobald Ra A zur Genüge abgeklungen ist. Es wurden daher Bleche in Radiumemanation aktiviert und nach dem Herausnehmen absichtlich durch Aufstoßen oder Hin- und Herbiegen erschüttert. In den Abklingungskurven (vgl. Fig. 24) zeigten sich dann tatsächlich Störungsstellen, die ein ähnliches Bild geben wie die fragliche Erscheinung. Auch die Unterlage, auf die abspritzende Teilchen fallen mußten, wurde untersucht; sie zeigte sich aktiv, und zwar (vgl. Fig. 25), wie sich aus der Aktivierungsdauer (15') ergibt, zeigt sich eine etwas andere Kurve als einer Aktivierung in Radiumemanation entsprechen würde. Es ist fast die reine Abklingungskurve von Ra C.

Einer Deutung der Erscheinung in dieser Weise widerspricht jedoch einmal, daß sie sich nie so ausgeprägt durch dies Experiment wiederholen ließ, wie sie sich bei den Aktivierungen in der freien Atmosphäre zeigte; zweitens finden sich bei diesem Experiment manchmal mehrere Störungsstellen, wie auch Fig. 24 zeigt, während bei den aktivierten Drähten regelmäßig nur ein solcher Anstieg mit einer Maximalstelle bei einer bestimmten Zeit sich zeigte. — Ein weiteres Eingehen auf diesen Punkt soll an diesem Ort wegen der geringeren Wichtigkeit der Erscheinung für die hier in Frage kommenden Punkte unterbleiben.

1) H. Gerdien, a. a. O.

2) K. Kurz, a. a. O.

II. Teil.

**Über Wirkungsweise und Bedeutung der radioaktiven Stoffe
in der Atmosphäre.**

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit die Natur der radioaktiven Substanzen in der Atmosphäre und das Mengenverhältnis der verschiedenen in Betracht kommenden Stoffe klargelegt worden ist, soll im zweiten Teil gezeigt werden, welche Bedeutung diesen Stoffen im Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre zukommt.

Nach der mehr qualitativen Arbeit des Aufstellens von Hypothesen über den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre und ihrer Verteidigung ist man in neuerer Zeit dazu übergegangen, die einzelnen Hypothesen quantitativ auszuwerten, d. h. zu untersuchen: Welchen Beitrag zur Aufrechterhaltung des in der Atmosphäre vorhandenen stationären Zustandes vermögen die einzelnen Vorgänge zu liefern. — Die Entdeckung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre fiel geschichtlich in diese Zeit, in der man noch nach einzelnen Vorgängen suchte, die durch Ionenerzeugung den durch allerhand Umstände sich fortwährend mindernden Ionengehalt auf normaler Höhe zu halten vermögen. Glaubte man anfangs in den radioaktiven Stoffen den gesuchten Hauptionisator gefunden zu haben, so schienen später quantitative Messungen zu zeigen, daß diesen Substanzen nur eine verschwindende Rolle im ganzen Ionenhaushalt zukommt.

Hier soll nun gezeigt werden, daß die Wahrheit in der Mitte liegt, daß den radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre und in den obersten Schichten des Erdbodens ein nicht unwesentlicher Beitrag zu der pro Zeiteinheit in der Raumeinheit zu erzeugenden Ionenmenge zu danken ist.

Wir wollen hier auch das Beobachtungsmaterial anderer Forscher heranziehen zur Klärung dieses Verhaltens. Aus diesem Grunde soll zunächst ein weiteres Resultat besprochen werden, das bei den Untersuchungen über die Wirkungen einer Variation der Expositionsspannung gefunden wurde: Die Reduktion der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl auf absolutes Maß, ein Resultat, das uns ermöglicht, das in dieser Form gegebene umfangreiche Beobachtungsmaterial für unsere Zwecke zu verwerten. — Ehe dann Wirkungsweise und Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Elektrizitätshaushalt erörtert wird, soll weiter zuerst ihre Abhängigkeit von meteorologischen Daten besprochen werden, ein Umstand, der ebenfalls mancherlei zu klären vermag.

A. Reduktion der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl auf absolutes Mass.

Die „Aktivierungszahl“ wurde von Elster und Geitel eingeführt als Vergleichsmaß für die Radioaktivität der Atmosphäre an verschiedenen Orten. Sie giebt an, um wieviel Volt die Spannung des Elster-Geitelschen Elektrometers in 1 Stunde sinkt durch Einbringen von 1 m des in freier Atmosphäre aktivierten Drahtes in den Zerstreuungsraum. Der Draht sollte bei — 2500 Volt Spannung 2 Stunden aktiviert sein. Es war natürlich von großer Wichtigkeit bei der Erschließung dieses neuen Gebietes ein Vergleichsmaß zu haben, das gestattete, die an verschiedenen Orten gewonnenen Resultate aufeinander zu

beziehen. Die auf einem Draht angesammelte Substanzmenge, also auch die „Aktivierungszahl“, giebt jedoch noch kein absolutes Maß für den wirklichen Gehalt der Luft an radioaktiven Stoffen; doch stehen beide Größen in einem gewissen Zusammenhange. Dem Wunsche, das große, bereits vorliegende Beobachtungsmaterial zu retten durch nachträgliche Reduktion auf absolutes Maß, entsprang der Versuch, jenen Zusammenhang zu finden. Dabei mußte natürlich, wie sich aus den bisherigen Betrachtungen ergibt, Rücksicht genommen werden auf Aktivierungsdauer, Aktivierungsspannung und Beobachtungsinstrument. Sind freilich an den verschiedenen Beobachtungsorten in den Zeiten der Messungen durch meteorologische Verhältnisse die Beweglichkeiten der Substanzen wesentlich verschieden gewesen, so ist dieser Fehler nicht mehr nachträglich zu korrigieren. Es kann ja auch nur der Zweck der Reduktion einer nicht gut definierten Größe sein, wenigstens annähernd den Zusammenhang mit absoluten Größen nachträglich festzulegen.

Die Reduktion ist so gedacht, daß am selben Orte gleichzeitig absolute quantitative Bestimmungen des Gehaltes der Luft an radioaktiven Stoffen und Bestimmungen der Elster-Geitelschen Aktivierungszahl vorgenommen werden. — Aus Kurve 10 entnehmen wir den Wert, der einer Aktivierungsspannung von — 2500 Volt entspricht. Unter Zugrundelegung der Kapazität des von mir benutzten Elektrometers berechnen wir den Sättigungsstrom, die Elektrizitätsmenge, die bei der Ionisation im Zerstreungsgefäß durch den 23,55 m langen Draht in der Zeiteinheit neutralisiert worden ist. Unter Berücksichtigung der Kapazität des Elster-Geitel-Apparates bestimmen wir dann den Spannungsrückgang in Volt pro Stunde, den 1 m des Drahtes im Elster-Geitel-Apparat bewirkt hätte. Beachten wir ferner, daß die der Fig. 10 entnommene Zahl einer Aktivierung des Drahtes bis zur Maximalaktivität entspricht und berechnen wir nach Formeln (21)–(24), welche Aktivität in der bei Elster und Geitel vorgesehenen Aktivierungsdauer von 2 Stunden erreicht worden wäre, so kommen wir schließlich zu dem Resultat: Ein in Gießen bei — 2500 Volt 2 Stunden lang aktivierter Draht verursacht in einem Elster-Geitelschen Zerstreungsapparat im Mittel einen Spannungsrückgang von 13 Volt pro Stunde und Meter. D. h. für Gießen würde sich die Aktivierungszahl $A = 13$ ergeben als Durchschnittswert aus einer großen Zahl von Beobachtungen. Elster und Geitel finden in Wolfenbüttel 20 als Aktivierungszahl¹⁾ aus einer über längere Zeit sich erstreckenden Beobachtungsreihe. Bei den lokalen Verschiedenheiten von Gießen und Wolfenbüttel befinden sich beide Werte in guter Übereinstimmung.

Nun habe ich in Gießen an der gleichen Stelle quantitative Bestimmungen des Gehaltes der Atmosphäre an radioaktiven Stoffen nach einer Aspirationsmethode ausgeführt.²⁾ Es ergab sich als Mittelwert $7,16 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. pro m^3 , d. h. die in einem Aspirationsapparat auf der negativ geladenen Elektrode abfangbaren festen radioaktiven Stoffe der Atmosphäre vermögen im m^3 Luft einen Sättigungsstrom von $7,16 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. zu unterhalten. [Es sei schon hier zur Vermeidung von Mißverständnissen auf einen Punkt aufmerksam gemacht, dessen Bedeutung erst später erörtert wird: Auch bei solchen quantitativen Bestimmungen nach der Aspirationsmethode, wie sie bis jetzt in Wien, Göttingen und Gießen ausgeführt sind, mißt man nur den Gehalt der Atmosphäre an solchen radio-

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. Zeitschr. 5, 11, 1904.

²⁾ K. Kurz, Phys. Zeitschr. 9, 177–184, 1908; Dissertation, Gießen 1907.

aktiven Stoffen, die im elektrischen Felde eine Wanderung nach der Kathode hin beginnen und zwar eine Wanderung von solcher Geschwindigkeit, daß sie nicht mit dem Luftstrom durch den Aspirator hindurchfliegen. Es handelt sich auch hier im wesentlichen um eine primäre Ablagerung von Ra A.]

Der Wert $7,16 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. ist in guter Übereinstimmung mit Werten, die an anderen Orten ebenfalls nach einer Aspirationsmethode gefunden wurden. In Wien¹⁾ erhält man (bei richtiger Korrektur der Zahlenangaben²⁾) $4,2 \cdot 10^{-5}$ E. S. E., in Göttingen³⁾ $12,38 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. Der Gießener Wert $7,16 \cdot 10^{-5}$ liegt dem Mittel aus diesen nach gleichem Prinzip ausgeführten quantitativen Messungen, dem Werte $7,90 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. sehr nahe. Gerade deshalb ist er für die weiteren Betrachtungen geeignet.

Es entspricht also in Gießen einem Gehalt der Atmosphäre an festen radioaktiven Stoffen von $7,16 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. die Elster-Geitelsche Aktivierungszahl 13. Mithin können wir die Aktivierungszahl als gleichbedeutend ansehen mit rund $0,5 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. Damit lassen sich nun Beobachtungen, die an verschiedenen Orten nach verschiedenen Methoden gewonnen sind, direkt aufeinander beziehen.

B. Abhängigkeit von meteorologischen Elementen.

Bei allen luftelektrischen Messungen können meteorologische Faktoren entweder in direkter oder indirekter Weise mitspielen, meistens freilich in beiderlei Weise. Das ist natürlich auch bei den Messungen der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre der Fall. Denn einmal ist der Gehalt der Luft an solchen Substanzen abhängig von der Emanationsmenge, die dem Erdboden entströmen kann. Zweitens haben wir als wichtigen Faktor bei all diesen Erscheinungen die Beweglichkeit der Teilchen, ihre spezifische Geschwindigkeit im elektrischen Felde erkannt. Die Beweglichkeit aber ist hier genau wie bei den Ionen der Atmosphäre, eben nicht nur von Ladung und ursprünglicher Masse, sondern von all den äußeren Bedingungen abhängig, die eine Änderung der Ladung oder der Masse herbeiführen können.

Dies zeigte sich auch bei unseren Versuchen zunächst an der Wirkung des Luftdrucks. Schwankungen des Luftdrucks können leichter auf die Thoriumemanation einwirken als auf die Radiumemanation. Der Grund liegt in dem großen Unterschied der Lebensdauern. Bei der kurzen Halbwertszeit der Thoremanation, die nach Sekunden zählt, ist zu erwarten, daß die Amplituden der Schwankungen im Thoriumgehalt größer sind als die im Radiumgehalt der Atmosphäre. Tabelle 9 gibt eine Reihe von Beobachtungssätzen, in denen Aufnahmen, die bei gleicher Spannung gemacht sind, nach Barometerständen geordnet wurden. Zunächst zeigt sich, daß eine Abhängigkeit der Aktivität von dem Barometerstand in dem erwarteten Sinne nicht ohne weiteres zu konstatieren ist. Man hätte erwarten können, daß einem geringen Barometerstande hohe Aktivitätszahlen entsprächen, da bei geringerem Luftdruck größere Emanationsmengen mit der Bodenluft dem Boden entquellen. Der Grund zu dem abweichenden Verhalten liegt einmal darin, daß für das Emporquellen der Bodenluft nicht die Höhe des Luftdrucks, der Barometerstand,

¹⁾ K. W. F. Kohlrausch, a. a. O.

²⁾ K. Kurz, Dissertation, Gießen 1907; Phys. Zeitschr. 9, 177, 1908; Phys. Zeitschr. 9, 218, 1908.

³⁾ H. Gerdien, a. a. O.

das maßgebende ist, sondern die Änderung des Barometerstandes. Ein Sinken des Luftdrucks erleichtert das Austreten der Bodenluft, ein Steigen erschwert es.

Tabelle 9.

a) Spannung: — 4600 Volt.		
Barometer-stand	Radium-aktivität	Thor-aktivität
731,6	850	152,7
739,2	1010	25,8
739,8	856	162,2
740,0	1340	205,5
741,6	1161	122,0
741,8	1475	—
741,8	2770	—
742,8	1220	290,0
743,2	918	184,0
755,9	1180	—
b) Spannung: — 1200 Volt.		
742,8	400	
749,6	1160	
749,9	295	
755,9	615	
755,8	228	
c) Spannung: — 500 Volt.		
731,6	93	
739,2	126	
740,0	178	
741,6	258	
741,8	192	
741,8	208	

Die Tabellen zeigen eher im allgemeinen höhere Aktivitätswerte für die höheren Barometerstände. Hier spricht eben die indirekte Wirkung des Luftdrucks mit: Die höheren Barometerstände entsprechen Tagen mit „schönem Wetter“, sonnigen, klaren Tagen, an denen große Beweglichkeiten der radioaktiven Stoffe erhalten blieben, während sie bei der hohen relativen Feuchtigkeit der Tage mit niederem Barometerstand stark heruntergedrückt wurden. Die Aufzeichnungen über die Wetterlage zeigen durchweg, daß an sonnigen, heiteren Tagen hohe Aktivitäten gemessen werden können, an trüben, regnerischen Tagen geringe Aktivitäten. Der Grund liegt also nicht etwa allein in dem verschiedenen Gehalt der Atmosphäre an solchen Stoffen, sondern vor allem an der verschiedenen Beweglichkeit der radioaktiven Teilchen im elektrischen Felde.

Die direkte Wirkung der Luftdruckschwankungen ist auch aus den Tabellen zu ersehen, wenn man die Amplituden der Schwankungen von Radium und Thor ins Auge

faßt: Die prozentualen Abweichungen der Einzelwerte vom Durchschnittswert sind bei Thor größer als bei Radium. Daneben spielt natürlich auch für das Verhältnis von Thor und Radium die indirekte Wirkung des Luftdrucks ihre Rolle: Die Beweglichkeit der Thorpartikel, die von vornherein geringer ist, kann natürlich leichter so weit heruntergedrückt werden, daß die Teilchen sich unserem elektrischen Felde und damit unserer Beobachtung entziehen. Das drückt sich einmal natürlich auch in der prozentualen Schwankung aus, zweitens aber zeigt sich, daß Nebel leicht die Thoraktivität bis zu unmeßbaren Größen herunterdrückt. Bei einer großen Reihe von Beispielen war trotz verhältnismäßig großer Radiumaktivität die Thoraktivität nicht mehr nachweisbar. Der Grund lag in dem während der Aktivierung herrschenden Nebel.

Im gleichen Sinne wirken Regenfälle kurz vor und während der Aktivierung des Drahtes. Im allgemeinen zeigt sich, daß sowohl die absolute Menge der abgefangenen Substanz als auch vor allem der Prozentsatz an Thorzerfallsprodukten um so größer gefunden wird, je klarer und sonniger der Tag ist. Der indirekte Einfluß der Temperatur auf die gesamten Verhältnisse ist danach auch ohne weiteres klar.

Zwei unter sonst gleichen äußeren Bedingungen gemachte Aufnahmen, von denen die eine kurz vor, die andere kurz nach dem Auftauen des schwach gefrorenen Bodens angestellt wurde, zeigen das nach obigem zu erwartende Resultat: Vor dem Auftauen kaum nachweisbare Thoraktivität, nach dem Auftauen verhältnismäßig sehr hohe Aktivität. Die Verhältnisse für die Radiumaktivität lagen dabei sogar so, daß im ersten Fall die größere Menge konstatiert wurde. — Schneefall hatte auffallend niedrigere Gesamtwerte zur Folge, wie auch zu erwarten, da die Schneeflocken radioaktive Zerfallsprodukte aus der Luft mit herunterreißen.

C. Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre.

Eine Besprechung der Wirkungsweise der radioaktiven Stoffe wird uns unmittelbar zu den Wirkungen führen, die diese Substanzen für den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre zu vollbringen vermögen.

1. Wirkungsweise der radioaktiven Stoffe.

Wir haben für die Ionenbildung in der Atmosphäre scharf voneinander zu trennen die Wirkungen der verschiedenen Strahlen, der α -, β -, γ -Strahlen. Für die Wirkung der α -Teilchen kommen nur die Substanzen in Betracht, die sich bereits gasförmig oder fest in der freien Atmosphäre befinden und zwar wegen des geringen Durchdringungsvermögens der α -Teilchen für gewöhnliche Materie. Die Reichweite in Luft für die hier in Betracht kommenden α -Teilchen geht von 4,33 cm für das α -Teilchen der Radiumemanation bis 8,6 cm für das α -Teilchen des Thorium C. Auf dieser Strecke vermag ein α -Teilchen rund 100 000 Ionen zu erzeugen. Für die Ionisation der nicht unmittelbar dem Erdboden anliegenden Schichten der freien Atmosphäre durch α -Strahlung kommen also nur die Substanzen in Betracht, die sich bereits an der betreffenden Stelle befinden, nicht dagegen die, die sich noch in den obersten Schichten der Erdkruste aufhalten, und nur in geringem

Maße diejenigen, die infolge allmählichen Heruntersinkens aus der Atmosphäre eine dünne Decke an radioaktiver Substanz auf dem Erdboden gebildet haben.

β - und γ -Strahlen der bereits in der Höhe befindlichen Substanzen kommen wegen ihres geringen Ionisierungsvermögens, verglichen mit dem der α -Teilchen für die Ionisation dieser Schichten, nur wenig in Betracht trotz ihres großen Durchdringungsvermögens. Das wird sich zahlenmäßig zeigen lassen. Anders steht es mit der Wirksamkeit der β - und namentlich der γ -Strahlen, die von den Substanzen ausgehen, welche sich in den obersten Schichten der Erdkruste befinden, oder die sich auf die Bodenoberfläche aufgelagert haben. Hier ist zu bedenken, daß ein γ -Strahl eine Luftschicht von 1000 m Dicke durchsetzen muß, bis er auf 1% seiner Wirksamkeit geschwächt ist. Entsprechend läßt sich an der Durchdringungsfähigkeit der γ -Strahlung für die lockere Erdschicht der an Bodenluft reichen oberen Schichten zeigen, daß noch aus verhältnismäßig beträchtlicher Tiefe ionisierende Strahlen, die ihre Ursache in dem Vorhandensein radioaktiver Stoffe haben, in die freie Atmosphäre treten. Diese sogenannte „durchdringende Strahlung“, deren Quelle nicht allein in den in der Luft vorhandenen Zerfallsprodukten zu suchen ist, sondern zum weitaus größten Teil in den in den obersten Schichten der Erdrinde allgemein verbreiteten radioaktiven Stoffen, muß mit berücksichtigt werden, wenn man angeben will, wieweit Radium, Thorium und Aktinium zur Ionisierung der Atmosphäre beitragen.

Zu diesen in der freien Atmosphäre selbst als eine Folge der Existenz der radioaktiven Stoffe entstehenden Ionen treten noch die Ionenmengen, die fertig gebildet mit der Bodenluft in die Höhe kommen, und die natürlich auch ihre Entstehung den im Boden vorhandenen radioaktiven Stoffen verdanken.

Da wir hier nur sehen wollen, wieweit diese Ionenquelle den Ionenmangel in der Atmosphäre wenigstens ungefähr zu decken vermag, wollen wir weiter nur die Hauptursache betrachten, durch die Ionen ständig verschwinden: die Wiedervereinigung der Ionen. Wir wollen also von den Erscheinungen der Adsorption, der Anlagerung an Wasserdampf, an Staubpartikelchen, der Molisierung absehen.

Sind n_1 und n_2 die Ionenzahlen beider Arten im cm^3 , ist α der Wiedervereinigungskoeffizient, so ist

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha \cdot n_1 \cdot n_2$$

die Änderung der Ionenzahl in der Zeiteinheit, wenn q die Zahl der in der Zeiteinheit in der Raumeinheit neu entstehenden Ionen bedeutet. Zur Erreichung des in der Atmosphäre tatsächlich bestehenden stationären Zustandes muß sein

$$q = \alpha \cdot n_1 \cdot n_2.$$

Die Beantwortung der hier gestellten Frage nach der Erhaltung dieses stationären Zustandes durch die radioaktiven Stoffe läuft also hinaus auf die Angabe eines q infolge der Anwesenheit solcher Substanzen und eines α , das durch n_1 , n_2 bestimmt ist.

Eine der Schwierigkeiten hierbei liegt in der Unsicherheit, die den bisher vorliegenden Bestimmungen des Wiedervereinigungskoeffizienten α anhaftet, eine zweite in den unsicheren Bestimmungen von n_1 und n_2 , den Ionenzahlen im cm^3 , da die Ionenzähler wesentlich nur „freie“ Ionen, Ionen mit bestimmter spezifischer Geschwindigkeit, die nicht unter eine

gewisse Grenze heruntergehen darf, abfangen können. Daher schwanken auch die Angaben über q , die Zahl der in der Zeiteinheit im cm^3 zu bildenden Ionen stark. Schuster¹⁾ gibt Werte für q zwischen 12 und 38, Rutherford²⁾ gibt 30, Eve³⁾ 1—5, diese freilich nach Messungen von n_1 und n_2 über dem Ozean.

2. Wirkung der radioaktiven Stoffe.

Von welcher Größenordnung sind nun die von den radioaktiven Stoffen insgesamt gelieferten Ionenmengen pro cm^3 und Zeiteinheit?

Bei quantitativen Bestimmungen des Gehaltes der Luft an radioaktiven Stoffen wird die Menge in zweierlei Weise angegeben: Entweder man bestimmt, mit wieviel g Radium die gefundene Menge radioaktiver Substanz, Emanation oder feste Zerfallsprodukte, im radioaktiven Gleichgewicht ist; oder man gibt an, welcher Sättigungsstrom in E. S. E. im m^3 Luft von den Substanzen unterhalten werden kann. Da man den Sättigungsstrom kennt, den die mit 1 g Radium im Gleichgewicht befindlichen Zerfallsprodukte unterhalten können, so lassen sich die Angaben einfach aufeinander umrechnen. Im folgenden ist statt des Sättigungsstroms die Zahl der Ionen gegeben, die durch die Anwesenheit der radioaktiven Stoffe im cm^3 erzeugt werden. — Direkte quantitative Bestimmungen des Gehaltes der Atmosphäre an radioaktiven Stoffen sind noch wenig gemacht. Zahlreich sind dagegen die Beobachtungen, die ihr Resultat in „Aktivierungszahlen“ angeben. Die oben gegebene Methode der Reduktion der Aktivierungszahl auf absolutes Maß gestattet uns nun, auch diese Beobachtungen quantitativ zu deuten, und damit steht uns bereits ein großes und über die verschiedensten Gegenden verbreitetes Beobachtungsmaterial zur Verfügung.

a) Wirkung der Emanation in der Atmosphäre.

Die bereits vorliegenden Bestimmungen des Gehaltes der freien Atmosphäre an Emanation sind nach zwei Methoden ausgeführt. Die eine beruht auf einer Kondensation der Emanation bei der Luftverflüssigung. Läßt man die Temperatur der flüssigen Luft über den Verdampfungspunkt steigen, so entweicht bei $-154^\circ 1\text{‰}$, bei $-152^\circ 1\frac{1}{2}\text{‰}$, bei $-150^\circ 50\text{‰}$ der kondensierten Emanation. — Die zweite Methode stützt sich auf die Eigenschaft der Holzkohle, vor allem der Holzkohle aus Kokosnußschalen, schon bei gewöhnlicher Temperatur der Luft die Emanation zu entziehen. Bei einer Erhitzung der Holzkohle auf $40\text{--}50^\circ \text{C}$. entweicht die Emanation wieder.

In Cambridge⁴⁾ wurden nach beiden Methoden Bestimmungen des Emanationsgehaltes der Atmosphäre ausgeführt; sie ergaben eine Emanationsmenge, die mit $100 \cdot 10^{-12}$ g Radium im Gleichgewicht ist. Nach der zweiten Methode, Anreicherung der Emanation in Kokosnußholzkohle, ist in Canada⁵⁾ in Nordamerika eine Bestimmung ausgeführt worden, die zu dem Werte $60 \cdot 10^{-12}$ g Ra führte, als der Radiummenge, die mit der vorhandenen Ema-

¹⁾ A. Schuster, Proc. Manchester Phil. Soc., 1904.

²⁾ E. Rutherford, Radioactivity, 2. Aufl., S. 526.

³⁾ A. S. Eve, Phil. Mag., Febr. 1907.

⁴⁾ J. Satterly, Phil. Mag. 15, 548—615, 1908.

⁵⁾ A. S. Eve, Phil. Mag. 15, 622—632, 1908.

nationsmenge im Gleichgewicht ist. (Die Einzelwerte schwanken zwischen dem ein- und siebenfachen Betrag.)

Es läßt sich nun ausrechnen, welche Ionenzahl durch diese Emanationsmenge in der Zeiteinheit im cm^3 gebildet wird. Im Falle des Radiums geschieht diese Bildung durch Aussendung eines α -Teilchens beim Zerfall eines Emanationsatoms. Da man weiter weiß, welche Mengen an radioaktiven Zerfallsprodukten Ra A, Ra B, Ra C mit dieser Emanationsmenge in radioaktivem Gleichgewicht sind, so läßt sich unter Berücksichtigung der Reichweiten der verschiedenen in Betracht kommenden α -Strahlenarten, also des verschiedenen Ionisierungsvermögens der α -Teilchen von Radiumemanation, Ra A, Ra C, berechnen, welche Ionenmengen im cm^3 in der Zeiteinheit durch die Radiumemanation und ihre Zerfallsprodukte in der freien Atmosphäre erzeugt werden. Diese Rechnung liefert für

Cambridge: 2,5 Ionen im cm^3 in der sec.,

Montreal (Canada): 1,5 Ionen im cm^3 in der sec.

Bestimmungen der Thor- und der Aktiniumemanation in entsprechender Weise sind bis jetzt noch nicht ausgeführt. Der Grund liegt in der experimentellen Schwierigkeit, diese kurzlebigen Produkte gesondert zu erhalten. Die Gesamtwirkung der α -Strahlen wäre zur Berücksichtigung von Thor und Aktinium nach dem ersten Teil dieser Arbeit um etwa 10 % zu erhöhen.

Eine ältere und nach einer anderen Methode ausgeführte Messung in Wien¹⁾ würde in dieser Umrechnung liefern: 15 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit.

b) Wirkung der festen Zerfallsprodukte in der Atmosphäre.

Direkte quantitative Messungen, die von einer Bestimmung der festen Zerfallsprodukte ausgehen, liegen zur Zeit auch nur wenige vor. In Göttingen,²⁾ Wien³⁾ und Gießen⁴⁾ wurden Messungen nach einer Aspirationsmethode ausgeführt, die unter sich gut übereinstimmende Werte gaben. Die Luft wird durch einen Zylinderkondensator gesaugt, die radioaktiven Substanzen, die sich auf der negativ geladenen Innenelektrode absetzen; werden in geeigneter Weise gemessen. Wir wollen wieder die Beobachtungsdaten in gleicher Weise umrechnen wie oben, d. h. angeben, welche Ionenmengen durch die gesamte vorhandene Substanzmenge, feste Zerfallsprodukte und dazu gehörige Emanationsmenge, geliefert werden. Zu berücksichtigen ist die im ersten Teil dieser Arbeit erkannte Tatsache, daß zur direkten primären Abscheidung auf der negativ geladenen Elektrode im wesentlichen nur das erste, aus der Emanation entstehende feste Zerfallsprodukt gelangt.

Dann erhalten wir unter Berücksichtigung der Thorwirkung in

Wien: 0,44 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit,

Gießen: 0,74 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit,

Göttingen: 1,30 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit,

im Mittel also eine Erzeugung von 0,82 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit. Die Übereinstimmung der Werte ist gut, wenn man bedenkt, daß die Einzelwerte großen Schwankungen

¹⁾ R. Hofmann, Phys. Zeitschr. 6, 337, 1905.

²⁾ H. Gerdien, a. a. O.

³⁾ K. W. F. Kohlrausch, a. a. O.

⁴⁾ K. Kurz, a. a. O.

unterworfen sind, daß meine Gießener Werte z. B. zwischen dem Ein- und Vierfachen schwanken.

Zweierlei sagen diese Zahlen: Einmal fällt auf, daß die aus der Bestimmung der festen Zerfallsprodukte abgeleiteten Zahlen im ganzen kleiner sind als die aus Emanationsmessungen berechneten. Freilich der Göttinger Wert mit 1,30 und der von Montreal in Nordamerika mit 1,50 sind in überraschender Übereinstimmung, wenn man die verschiedene geographische und geologische Lage und vor allem eben die verschiedenen Methoden bedenkt, die zu diesen Werten geführt haben.

Der Grund für die größeren Werte bei Emanationsbestimmungen ergibt sich wieder aus dem ersten Teil der Arbeit. Wir hatten uns da die Aktivierung eines Drahtes, hier nun entsprechend die Aktivierung der inneren, negativ geladenen Elektrode des Aspirationsapparates so gedacht: Die Emanation umspült den zu aktivierenden Körper, und die aus der Emanation unmittelbar entstehenden, positiv geladenen, sehr beweglichen Ra A-Teilchen setzen sich auf der negativ geladenen Elektrode ab. Alle etwas „älteren“ Ra A-Teilchen und die übrigen Zerfallsprodukte sind schon bald nach ihrer Entstehung molisiert, für das elektrische Feld nicht mehr oder doch nur zu einem Bruchteil vorhanden. Saugen wir also Luft und damit Emanation durch den Kondensator des Aspirationsapparates, so werden nur die verhältnismäßig „jungen“ Ra A-Teilchen abgefangen. Jedenfalls besteht bei dieser Methode dieselbe Gefahr wie bei den Ionenzählungen: Die schwerer beweglichen Partikel fliegen unbehelligt durch den Apparat hindurch. Das würde erklären, daß wir durch Emanationsbestimmung einerseits, Bestimmung der festen Zerfallsprodukte andererseits zu Ionenzahlen von gleicher Größenordnung kommen, daß aber die Emanationsbestimmungen die größeren Zahlenwerte liefern. Im allgemeinen wird man sagen können, daß man immer Gefahr läuft, zu verhältnismäßig zu kleinen Zahlenwerten zu kommen, wenn man die Bestimmung der Zerfallsprodukte auf den Versuch stützt, sie in einem elektrischen Felde abzufangen.

Zweitens: Ein Vergleich mit den S. 48 gegebenen Werten für q , der Ionenzahl, die pro Zeiteinheit im cm^3 erzeugt werden muß zur Aufrechterhaltung des stationären Zustandes in der Atmosphäre, sagt: Die α -Strahlwirkung der in der Atmosphäre suspendierten radioaktiven Stoffe, und zwar der Emanationen samt ihren Zerfallsprodukten, vermag nur einen Bruchteil der zur Aufrechterhaltung des Elektrizitätshaushaltes nötigen Ionisierungsarbeit zu leisten.

Es sind nur wenige direkte quantitative Messungen, die uns dies Resultat geliefert haben. Gerade darum ist es von Interesse, auf indirektem Wege Vergleichsmaterial zu erhalten. Messungen in Aktivierungszahlen liegen, wie bereits bemerkt, von zahlreichen Orten vor. Der Durchschnittswert für Gießen betrug 13. Dem entspricht eine Ionenerzeugung von 0,74 pro cm^3 und Sekunde. Also können wir zur Reduktion der Aktivierungszahl auch angeben, daß der Aktivierungszahl 1 eine Ionenerzeugung von 0,057 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit entspricht. Es ist bereits oben darauf aufmerksam gemacht, daß der Wert nur in erster Annäherung richtig sein kann, und daß er die durch meteorologische Umstände bedingten Schwankungen nicht mehr zu beseitigen vermag. Zur Orientierung in diesem noch unbekannten Gebiet und zur nachträglichen Umwertung eines großen Beobachtungsmaterials auf absolutes Maß vermag der Zusammen-

hang immerhin gute Dienste zu leisten. In Tab. 10¹⁾ habe ich eine größere Zahl von Beobachtungen umgerechnet. Die erste Spalte gibt den Beobachtungsort, die zweite die pro cm^3 und sec. durch radioaktive Stoffe erzeugte Zahl von Ionen.

Tabelle 10.

Ort	Ionenzahl
Juist, Zinnowitz . .	0,40
Swinemünde . . .	2,05
Wolfenbüttel . . .	1,08
Halle	0,79 ₆
Freiburg (Schweiz)	4,77
Arosa	5,17
Kochel	7,83
Altjoch	5,70
Benediktbeuren . .	2,47
Herzogstand . . .	2,93
Hammerfest . . .	5,73
Karasjok	5,29
Palma	2,16
Großer Ozean . . .	0,05 ₁ —0,25 ₆
„ „ Nähe	
des Landes . . .	2,27
Auf freier See . . .	0,00
Clausthal	1,88
Wolfenbüttel	
a) Maximum . . .	2,85
b) Minimum . . .	0,28 ₃

Betrachtet man die Unterschiede an den einzelnen Orten, so sieht man, daß sich die bei direkten Messungen erhaltenen Resultate, wie sie Tab. 11 nach der Größe geordnet zeigt, gut einfügen.

Tabelle 11.

Ort	Ionenzahl
Wien	0,44
Gießen	0,74
Göttingen	1,30
Montreal	1,50
Cambridge	2,50

Auf eine Diskussion der Werte einzugehen, wäre hier nicht am Platze; uns interessiert die Feststellung der Tatsache, daß bei allen Messungen, die bisher angestellt wurden, die

¹⁾ A. Gockel, Lufterlektrizität, S. 178; vgl. die dort angeführten Literaturangaben.

α -Strahlung der in der Luft suspendierten radioaktiven Stoffe nicht ausreicht zur Bildung der zur Aufrechterhaltung des stationären Zustandes erforderlichen Ionenzahl. Einzelne der beobachteten Werte freilich zeigen, daß doch auf diesem Wege unter Umständen immerhin ein erheblicher Bruchteil der zu liefernden Ionenzahl zustande kommt. Zwei andere Momente sind eben m. E. hier von großer Wichtigkeit: 1. Die durchdringende Strahlung der radioaktiven Stoffe, 2. die dem Boden entströmenden, bereits fertig gebildeten Ionen, die ihre Entstehung den radioaktiven Stoffen in den obersten Schichten der Erdoberfläche verdanken.

c) Wirkung der durchdringenden Strahlung in der Atmosphäre.

Ist auch die Ionisierungsfähigkeit der von den radioaktiven Stoffen in der freien Atmosphäre ausgehenden β - und γ -Strahlung verschwindend gegenüber der α -Strahlung, so ist doch ihre Reichweite um so größer. Trotzdem ist, wie sich zeigen läßt,¹⁾ die gesamte Ionisierungsarbeit dieser durchdringenden Strahlung, soweit sie von den in der Luft suspendierten Teilchen ausgeht, nur etwa 6% der von der α -Strahlung geleisteten Arbeit.

Anders steht es mit der durchdringenden Strahlung, die vom Erdboden aus in den Luftraum hinausgeht. Die festen Zerfallsprodukte, die sich in dünner Schicht auf der Erdoberfläche ablagern und die radioaktiven Stoffe in den obersten Schichten der Erdschicht senden diese β - und γ -Strahlen in die Atmosphäre. Denn man hat tatsächlich beobachtet, daß in der freien Atmosphäre eine durchdringende Strahlung vorhanden ist, die der Größenordnung ihrer Wirkung nach nicht von den in der Luft suspendierten radioaktiven Zerfallsprodukten ausgehen kann. Rechnet man die Wirkung dieser durchdringenden Strahlung auf das von uns bisher gebrauchte Maß um, so erhält man eine Ionenbildung von 4,5 Ionen im cm^3 und in der Zeiteinheit.^{2) 3)} Da wir oben die Wirkung der von den in der Luft suspendierten Stoffen ausgehenden β - und γ -Strahlung zu 6% von etwa 2—3 Ionen pro cm^3 und sec. angeben konnten, so haben wir den Ausgangspunkt dieser intensiven durchdringenden Strahlen in den radioaktiven Stoffen der obersten Bodenschichten zu suchen, wenn wir vorerst noch von der Möglichkeit einer aus dem Weltraum, also von außen her zu uns kommenden durchdringenden Strahlung absehen wollen. Man kann nun berechnen,⁴⁾ welche Menge an radioaktiver Substanz die obersten Schichten der Erdkruste enthalten müßten, wenn von ihnen eine durchdringende Strahlung von solcher Intensität

¹⁾ A. S. Eve, Phil. Mag. XII, 199, 1906.

²⁾ A. S. Eve, Phil. Mag. 12, 200, 1906.

³⁾ Eine nach Fertigstellung dieser Arbeit erschienene Untersuchung von Th. Wulf: „Über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit“, Phys. Zeitschr. 10, 152—157, 1909, führt sogar zu einem Mittelwert von 12 Ionen pro cm^3 und Zeiteinheit.

Bei dem von mir benutzten Elektrometer war der Luftraum nach außen hin vollständig durch Metall abgeschirmt. Machen wir die Annahme, daß der bei gut isolierendem Elektrometer in dem Zerstreungsraum ständig fließende sogenannte „Reststrom“ herrühren würde von einer von außen kommenden durchdringenden Strahlung, so müßte sie pro Zeiteinheit und cm^3 etwa 13 Ionen im Elektrometerraum erzeugen. Selbst bei Berücksichtigung des geringen Elektrizitätsüberganges über die einzige isolierende Bernsteinstütze und der von den Gefäßwandungen ausgehenden Strahlung kommen wir damit auch zu derselben Größenordnung für die Wirkung der durchdringenden Strahlung.

⁴⁾ A. S. Eve, Phil. Mag. 12, 195, 1906.

ausgehen soll. Die Rechnung führt zu Zahlen von derselben Größenordnung, wie sie Strutt bei seiner Untersuchung von Gesteinsproben auf Radiumgehalt gefunden hat, das ist etwa $4,25 \cdot 10^{-12}$ g Radiumbromid im cm^3 der Erdkruste.

Die bis jetzt vorliegenden Beobachtungen über die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre sind noch sehr spärlich. Aus der Gegenüberstellung ihrer Wirksamkeit mit der der in der Luft vorhandenen radioaktiven Stoffe ersieht man jedoch schon unmittelbar die Wichtigkeit dieses Faktors für den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre: Die durchdringende Strahlung, die ihre Ursache in der Anwesenheit radioaktiver Stoffe im Erdboden und in der Luft hat, erzeugt Ionenmengen, die von der Größenordnung der durch $q = \alpha \cdot n_1 \cdot n_2$ geforderten Menge sind. — Auf zweierlei sei hier kurz hingewiesen:

Einmal: Vermutlich haben wir in dieser durchdringenden Strahlung einen der Ionisatoren, die auch über dem Meere in intensiver Weise zu wirken vermögen. In welchem gänzlich verschwindendem Maße die in der Luft über dem Meere befindlichen radioaktiven Zerfallsprodukte an der Ionisierung mitarbeiten können, geht aus einzelnen Daten der Tab. 10 hervor. Weiterhin ist der Radiumgehalt des Seewassers 500 mal, der des Seesalzes 15 mal geringer als der einer gleichen Gewichtsmenge Sedimentärgestein.¹⁾ Dagegen kann aber die Konvektionsströmung im Wasser und die ständige Bewegung der Oberfläche einer γ -Strahlung, die sonst in der Tiefe verlaufen wäre, leichter den Austritt in die freie Atmosphäre gestatten.

Zweitens: Eine β - und γ -Strahlung wird von den Zerfallsprodukten aller vier bekannten radioaktiven Familien, Uran, Radium, Thorium, Aktinium, ausgesandt. Während für die Ionisation der Luft durch die in ihr suspendierten Stoffe nur Ra, Th, Akt in Betracht kommen, da nur diese Emanationen bilden, so stehen für die durchdringende Strahlung vier Stoffe zur Verfügung. Von den vier Familien sind Uran, Thorium, Aktinium mit je einem γ -strahlenden Zerfallsprodukt vertreten; Radium hat zwei γ -Strahler. Wie sich die vier Familien in den Gesamteffekt teilen, wieweit namentlich Uran X, dessen Wirksamkeit bis jetzt noch bei keinem der Luftionisierungsprozesse in Betracht gezogen worden ist, zur Gesamtwirkung beiträgt, ist noch nicht untersucht.

d) Wirkung der Bodenluft.

Wenn auch die direkte Wirkung der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre nur als ein geringer Bruchteil an der zu leistenden Ionisierungsarbeit zu bezeichnen war, so haben wir in der durchdringenden Strahlung, also gewissermaßen einer indirekten Wirkung, einen Faktor von großer Bedeutung erkannt. Freilich müssen eingehende Untersuchungen erst noch die Richtigkeit der Ergebnisse der ersten Versuche beweisen. Ein zweiter derartiger, indirekt wirkender Faktor, der seine Ursache in den radioaktiven Stoffen hat, zeigt sich in den mit der Bodenluft dem Erdboden entströmenden Ionen. Auch darüber liegen noch nicht genügend viel Messungen vor, die ein definitives Urteil erlauben. Immerhin aber können wir einige Zahlenbeispiele geben, die die wahrscheinlich große Bedeutung dieses Faktors und damit eine weitere Wirkung der radioaktiven Stoffe beleuchten.

Es ist ohne weiteres klar, daß in den obersten Schichten des Erdbodens eine bedeutende Anreicherung an radioaktiver Emanation und ihren Zerfallsprodukten statthaben muß, und

¹⁾ A. Gockel, Luftelektrizität, S. 174.

daß infolgedessen die Bodenluft, die in den Erdkapillaren in die Höhe quillt, bei den Schwankungen des Luftdrucks, einmal einer intensiven Ionisation unterworfen ist, dann aber auch bei ihren Bewegungen große Mengen von Emanation und ihren Zerfallsprodukten mit sich führt. Beim Ausströmen der Bodenluft aus dem Erdboden dringen daher nicht nur radioaktive Stoffe mit in die Höhe, sondern auch große Mengen fertig gebildeter Ionen quellen aus dem Erdboden.

Als Maß wollen wir wieder die Ionenzahl angeben, die im cm^3 Bodenluft in der Zeiteinheit durch die Anwesenheit der radioaktiven Stoffe gebildet wird.

Bodenluft, die direkt dem Boden entnommen war, lieferte in München¹⁾ rund 3000 Ionen pro cm^3 und sec., in Freiburg (Schweiz)²⁾ Werte zwischen 2000 und 8000. Diese ionenreiche Luft muß ihre Wirkung besonders auch in Kellern und abgeschlossenen Räumen bemerkbar machen: Kellerluft in Wien³⁾ zeigt 440 Ionen pro cm^3 und sec. Nach „Aktivierungszahlen“ von Elster und Geitel⁴⁾ läßt sich für einen von diesen Forschern untersuchten Brunnenschacht berechnen: 160 Ionen, für die Baumannshöhle im Harz 102.

Namentlich die für Bodenluft geltenden Zahlen zeigen, in welchem Maße sich die Bodenatmung an der Ionisierung der Atmosphäre unter Umständen beteiligen kann, wenn genügende Mengen Bodenluft in die freie Atmosphäre eintreten. Da eben hier in München Versuche abgeschlossen werden, die über diese Ionenquelle für den Elektrizitätshaushalt Aufschluß geben sollen, so wird hier nicht weiter auf diese Frage eingegangen.

Fassen wir die drei Wirkungen der radioaktiven Stoffe, die hier besprochen worden sind, zusammen, die Wirkung der in der Atmosphäre suspendierten Zerfallsprodukte von Radium, Thorium, Aktinium, die Wirkung der β - und γ -Strahlung, die von den in den obersten Schichten der Erdkruste verteilten Stoffen Uran, Radium, Thorium, Aktinium herrührt, die Wirkung der durch diese Stoffe in hohem Grade ionisierten Bodenluft, so sehen wir, daß eine Gesamtwirkung resultiert, die in der Größenordnung an die für den Elektrizitätshaushalt zu leistende Gesamtarbeit heranreicht. Wie weit die Gesamtionisation der Atmosphäre von den radioaktiven Stoffen tatsächlich bewirkt wird, kann erst entschieden werden, wenn erstens über die Wirkung der durchdringenden Strahlen und der Bodenatmung ein größeres Beobachtungsmaterial zur Verfügung steht, und wenn zweitens einwandfreiere Bestimmungen des Wiedervereinigungskoeffizienten und der Ionenzahlen in der Atmosphäre und damit der Zahl der pro sec. im cm^3 neu zu erzeugenden Ionen vorliegen.

¹⁾ H. Ebert und P. Ewers, Phys. Zeitschr. 4, 162, 1903; H. Ebert, Münch. Ber. 33, 133, 1903.

²⁾ A. Gockel, Luftelektrizität, S. 165.

³⁾ H. Mache und T. Rimmer, Phys. Zeitschr. 7, 617, 1906.

⁴⁾ Elster und Geitel, Phys. Zeitschr. 4, 96, 1902.

Zusammenfassung.

Die Ergebnisse vorstehender Arbeit lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. In der Atmosphäre lassen sich die Zerfallsprodukte der radioaktiven Stoffe nachweisen, die eine gasförmige Emanation erzeugen, also Radium, Thorium, Aktinium. Eine restlose Zerlegung der Abklingungskurven nach den Gesetzen der Zerfallstheorie ist möglich; danach finden sich in der Atmosphäre keine weiteren als diese drei radioaktiven Stoffe.
2. Für das Verhältnis der Aktivitäten von Ra, Th, Akt, das sich auf einem Draht ausbildet, ist neben dem Gehalt der Luft an solchen Stoffen die beim Aktivieren verwandte Spannung ausschlaggebend. Der Grund liegt in der verschiedenen spezifischen Geschwindigkeit der verschiedenen radioaktiven Zerfallsprodukte. Das Verhältnis der Aktivitäten steigt zugunsten der leichter beweglichen Substanz bei wachsender Spannung.
3. Als Durchschnittsverhältnis der Beweglichkeiten der Thor- und der Radiumzerfallsprodukte wird 1:2,9 gefunden.
4. Auf einem negativ geladenen Draht scheidet sich in der Atmosphäre primär im wesentlichen nur das erste aus der Emanation entstehende Glied ab. Die weiteren, nach längerer Exposition auch vorhandenen Glieder der Zerfallsreihe haben sich sekundär aus dem primär abgesetzten Glied gebildet. Danach scheint nur dem ersten, aus der Emanation entstehenden Glied eine positive Ladung zuzukommen. Wahrscheinlich ist auch die Beweglichkeit der übrigen Zerfallsprodukte durch Molisierung stark vermindert.
5. Die Bedeutung des Erdfeldes für die Aktivierung von negativ geladenen, ungeladenen und positiv geladenen Drähten wird untersucht. Auch ein positiv geladener Draht kann darnach unter der Wirkung des Erdfeldes positiv geladene Zerfallsprodukte ansammeln. Die Menge der von einem positiv geladenen Draht angesammelten Substanz ist gleich der auf einem ungeladenen Draht sich absetzenden. Die Aktivierung eines positiv geladenen Drahtes in der Atmosphäre ergibt sich damit zum großen Teil als eine Sekundärwirkung des Erdfeldes.
6. Es wird gezeigt, daß stangenartige (linienförmige), geerdete Leiter, die im Erdfelde radioaktive Substanzen auf sich ansammeln, um sich herum eine Luftschicht besitzen in Gestalt eines Zylinders mit einem Radius gleich der Reichweite der α -Strahlen, in der die Leitfähigkeit wesentlich größer ist als in der freien Atmosphäre. Die Erhöhung nimmt bei senkrecht stehenden Leitern mit der Höhe zu und kann an der Spitze eines 20 m hohen Drahtes 20—25% der Leitfähigkeit betragen. Bei dauernd negativ geladenen Drähten kann diese Erhöhung je nach der Höhe der angelegten Spannung Beträge von mehreren 100% der weiter außen herrschenden Leitfähigkeit annehmen.
7. Der Einfluß meteorologischer Elemente auf Höhe und Zusammensetzung der induzierten Aktivitäten wird besprochen.

8. Es wird versucht, die Elster-Geitelsche „Aktivierungszahl“ auf absolutes Maß zu reduzieren. Als Aktivierungszahl für Gießen wird 13, als absoluter Gehalt der Atmosphäre an festen radioaktiven Stoffen, die sich auf der negativ geladenen Elektrode eines Aspirationsapparates abfangen lassen, wird $7,16 \cdot 10^{-5}$ E. S. E. pro m^3 gefunden. Daraus wird berechnet, daß der Aktivierungszahl 1 eine Erzeugung von 0,06 Ionen pro cm^3 und Sekunde durch die Strahlwirkung der gesamten radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre entspricht.

9. Es wird gezeigt,

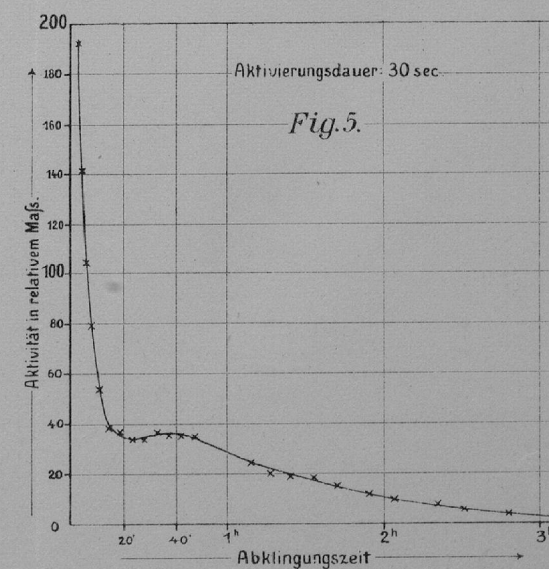
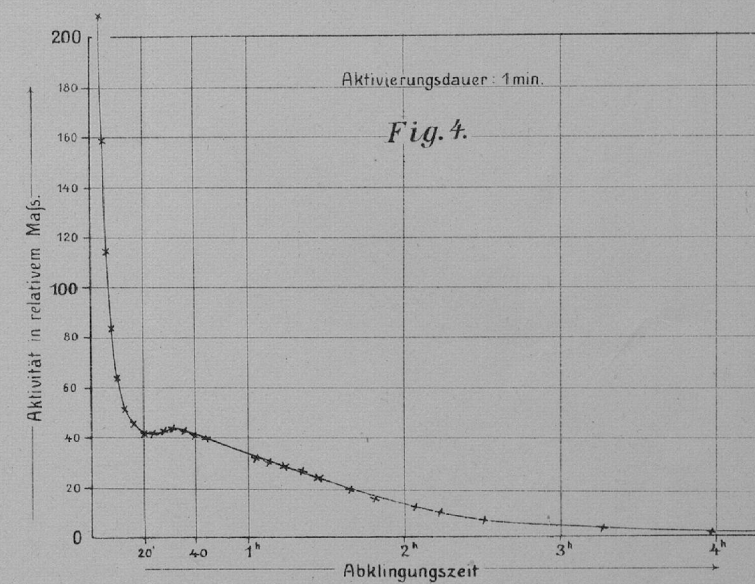
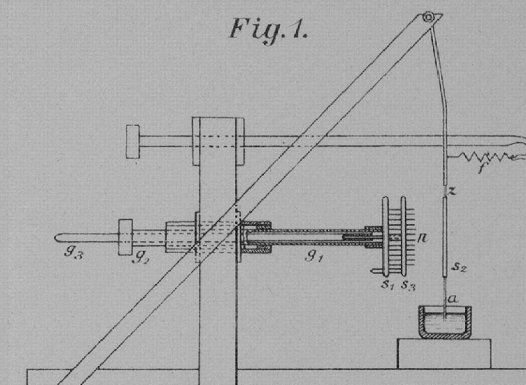
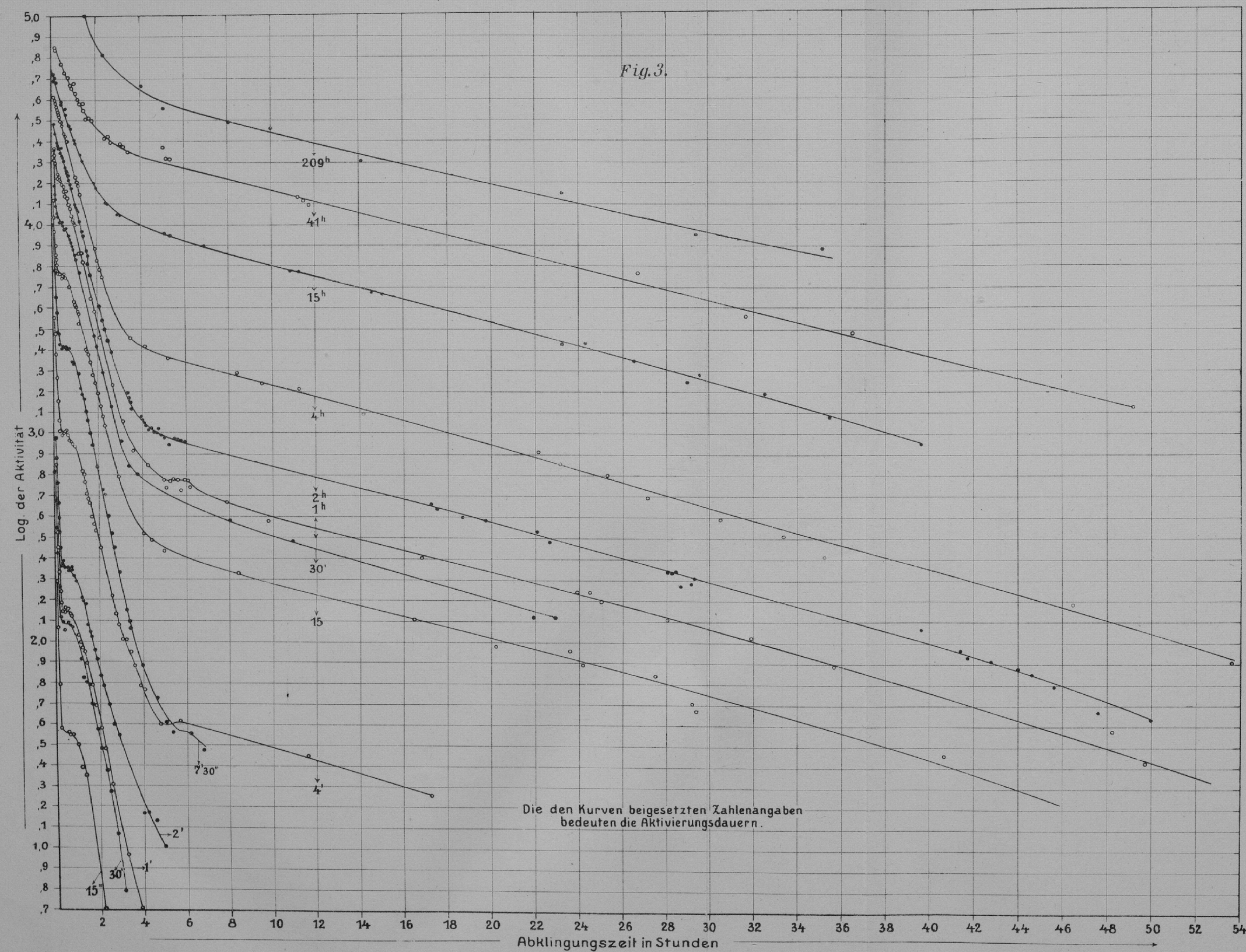
a) daß die in der Atmosphäre suspendierten radioaktiven Stoffe nur einen geringen Bruchteil der zur Aufrechterhaltung des Elektrizitätshaushaltes in der Atmosphäre nötigen Ionisierungsarbeit zu leisten vermögen,

b) daß hingegen bei Berücksichtigung der durchdringenden Strahlung und der Bodenatmung der Gesamtwirkung aller radioaktiven Stoffe eine grundlegende Bedeutung im Ionenhaushalt der Atmosphäre zukommt.

Der experimentelle Teil der vorliegenden Arbeit wurde im Jahre 1906 im Physikalischen Institut der Universität Gießen ausgeführt. Den Herren Professoren Walter König und Heinrich Willy Schmidt, meinen hochverehrten Lehrern, bin ich zu dauerndem Danke verpflichtet.

Die Ausarbeitung des Materials geschah im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München gleichzeitig mit den von mir im Auftrage der K. Bayer. Akademie der Wissenschaften vorgenommenen luftelektrischen Forschungen. Herrn Prof. H. Ebert danke ich herzlich für die anregende und liebenswürdige Unterstützung, mit der er meine Arbeiten gefördert hat.

München, Physikal. Institut der Techn. Hochschule, im März 1909.



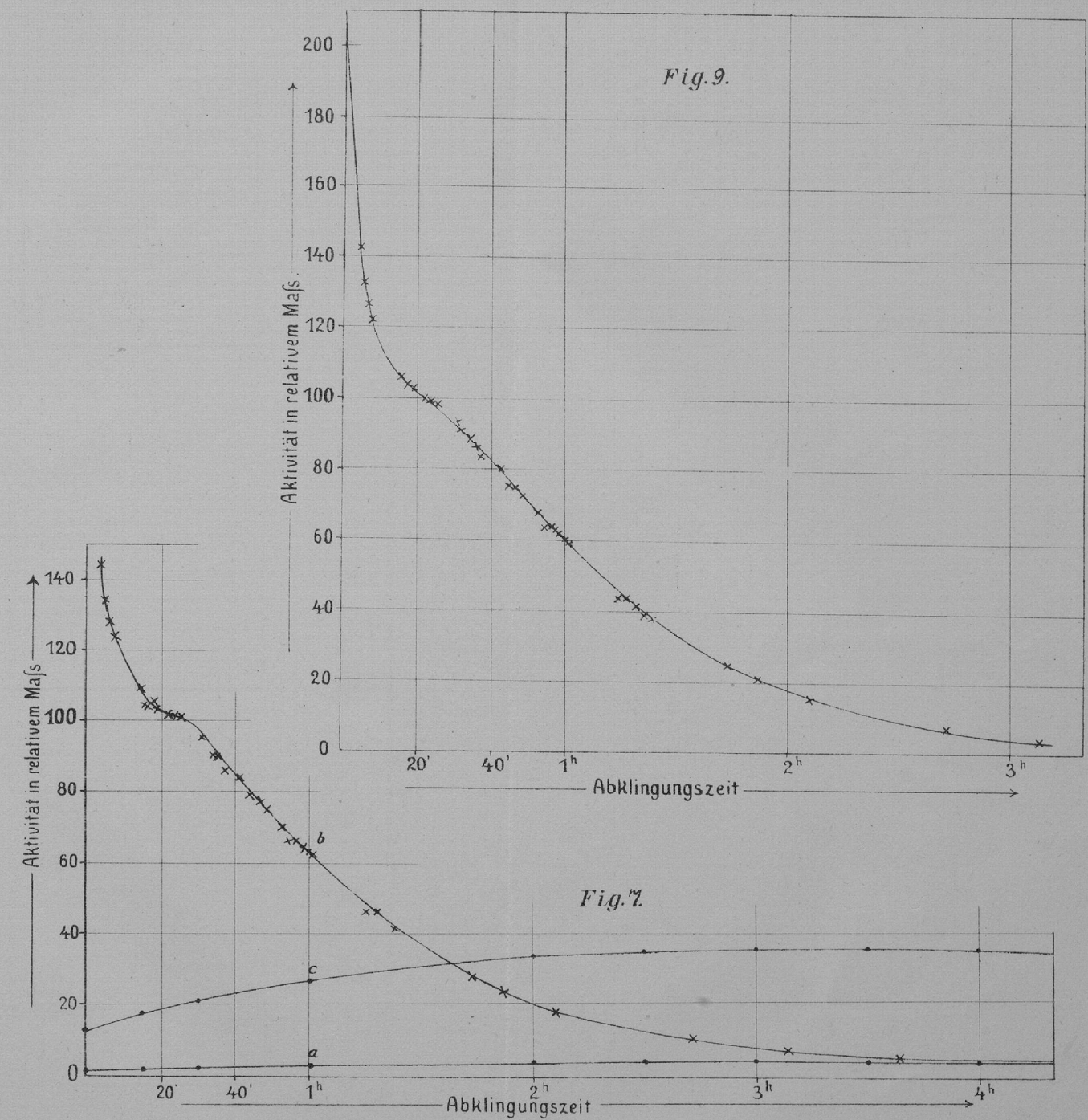
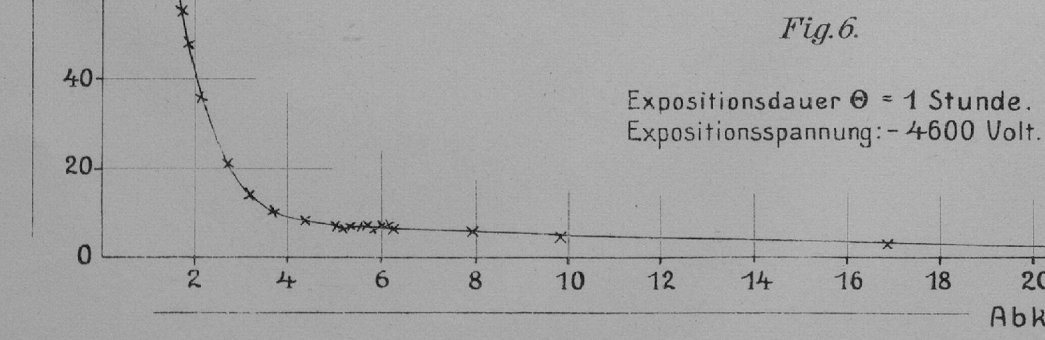
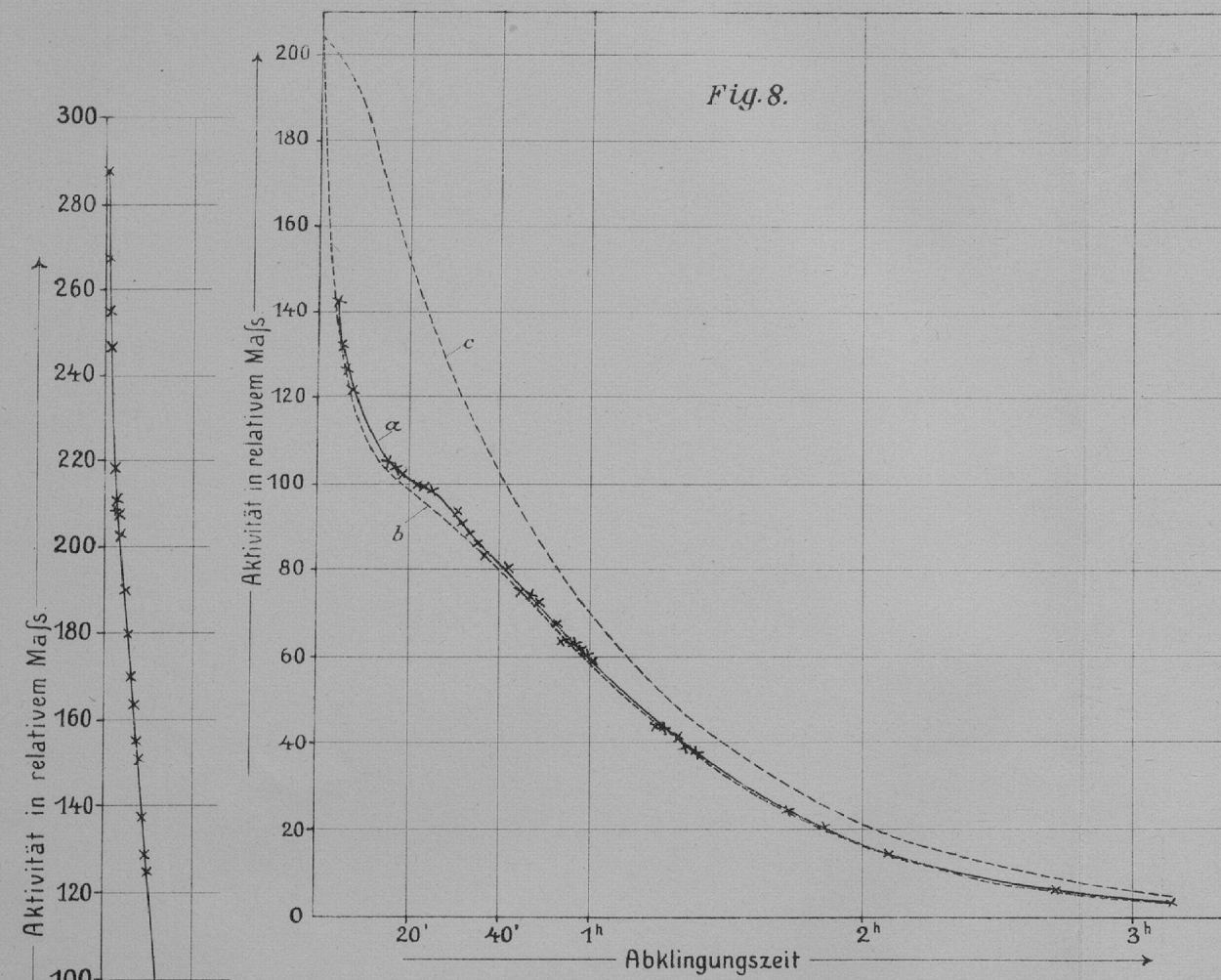


Fig. 11.

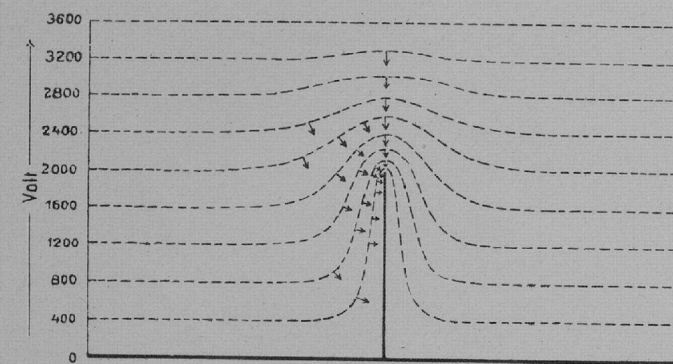


Fig. 12.

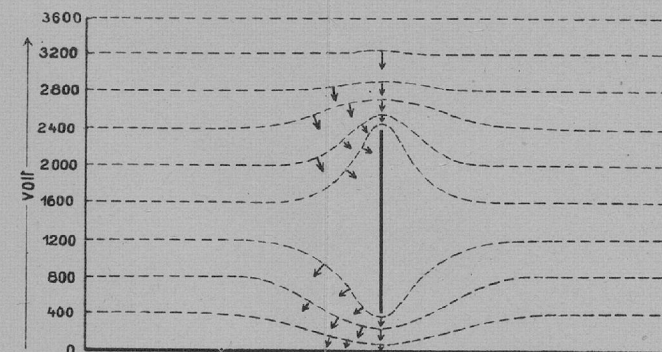


Fig. 17.

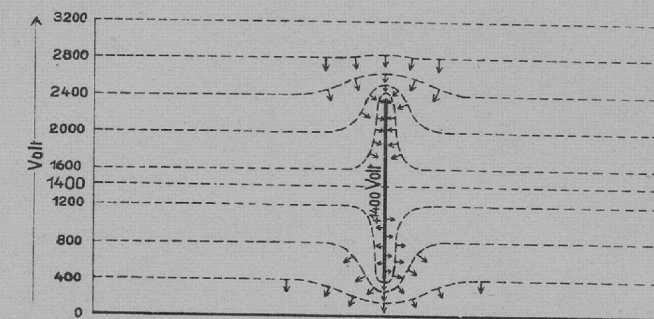


Fig. 18.

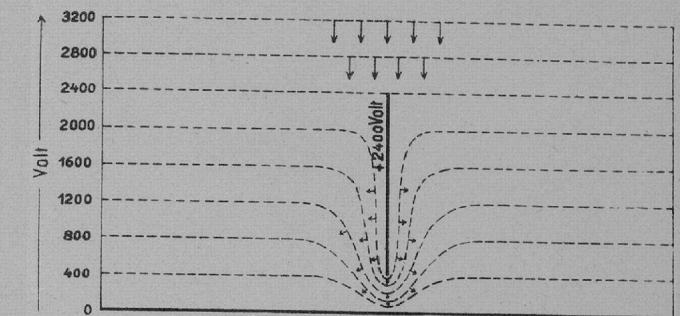


Fig. 13.

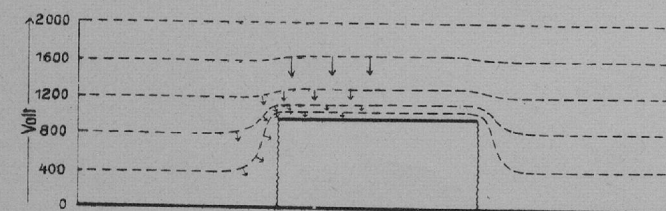


Fig. 14.

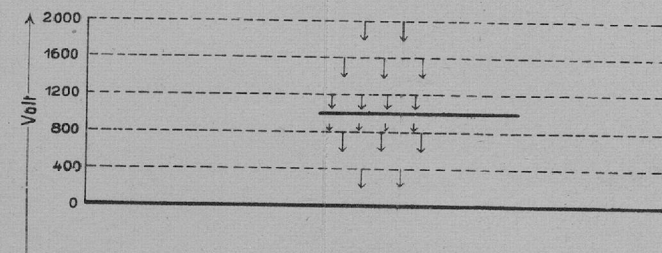


Fig. 19.

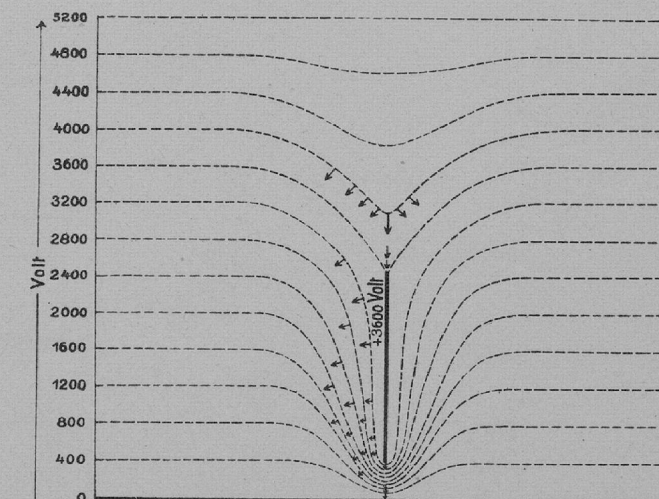


Fig. 20.

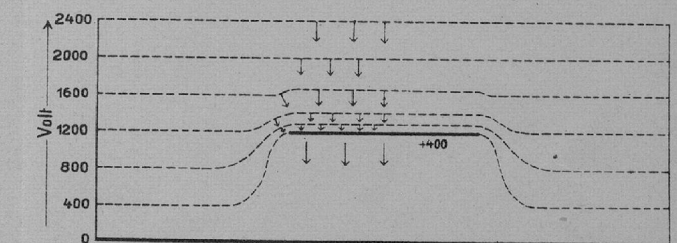


Fig. 15.

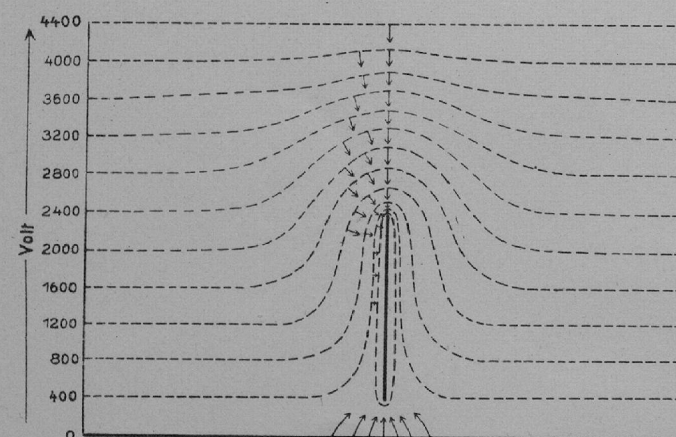


Fig. 16.

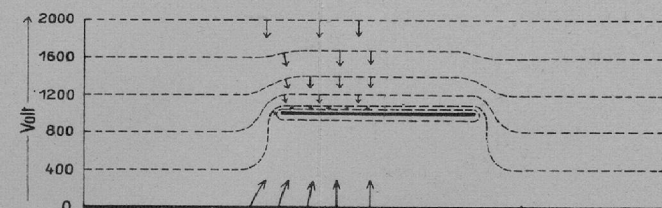


Fig. 21.

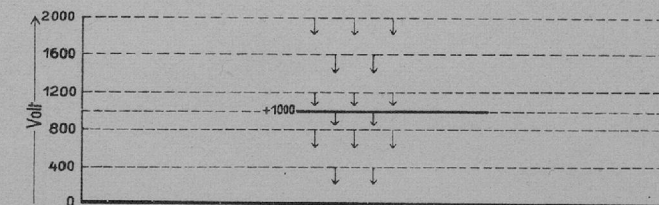


Fig. 22.

