

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Luftelektrizität

Gockel, Albert

Leipzig, 1908

Fünftes Kapitel. Die in der Atmosphäre wirkenden Ionisatoren

Es bleibt noch die Frage übrig, ob der permanente Magnetismus vollständig durch die Erdströme erklärt werden kann. Weder die Genauigkeit noch die Zahl der Erdstrommessungen reichen aber aus, um das magnetische Potential der Ströme in der von Gauß angewandten Darstellung der Kugelfunktion zu berechnen und die Koeffizienten mit den bereits berechneten erdmagnetischen zu vergleichen. Vorläufig müssen wir uns mit dem Resultat begnügen, daß die Schwankungen der Erdströme die Schwankungen des Erdmagnetismus fast vollständig erklären, und daß durch ihre und des lufterlektrischen Vertikalstromes Vermittlung die meteorologischen Faktoren den Erdmagnetismus beeinflussen¹⁾. Ein allgemeines Resultat möge hier noch Platz finden: Beobachtungen in den verschiedensten Ländern Europas haben ergeben, daß der Erdstrom im allgemeinen von SW nach NE fließt. Lokale Abweichungen auf kurzen Linien können aber vorhanden sein.

Fünftes Kapitel.

Die in der Atmosphäre wirkenden Ionisatoren.

1. Radioaktivität der Bodenluft. Zur Entscheidung der Frage, ob das auf der Ionisation beruhende Leitvermögen eine der Luft eigentümliche Erscheinung oder ob es von außen in die Atmosphäre hereingetragen wird, untersuchten Elster und Geitel²⁾ die Leitfähigkeit der Luft in geschlossenen Gefäßen. Gegen ihr Erwarten fanden sie, daß das Leitvermögen von unter einer Glasglocke abgeschlossener atmosphärischer Luft im Laufe einiger Tage auf das Mehrfache des ursprünglichen Betrages anwuchs, um schließlich konstant zu bleiben. Diese unerwartete Erscheinung glaubten die genannten Forscher zunächst auf den Umstand zurückführen zu können, daß eine abgeschlossene Luftmenge sich im Laufe der Zeit allmählich selbst von Staub reinige. Die zur Prüfung dieser Annahme angestellten Versuche³⁾ ließen aber einen Zusammenhang zwischen der im Laufe der Zeit erworbenen höheren

1) Vgl. auch Nippoldt, Über die meteorologische Natur der Variationen des Erdmagnetismus. Terr. Magn. 7, 101, 1902.

2) Elster und Geitel, Phys. Zt. 2, 116, 1900.

3) Phys. Zt. 2, 560, 1901.

Leitfähigkeit der abgeschlossenen Luftmenge und den Veränderungen im Staub- und Wasserdampfgehalt derselben nicht erkennen.

Da die Möglichkeit einer Verunreinigung der Laboratoriumsluft durch radioaktive Substanzen, z. B. solcher, welche von dem Thorerdestaub der Auerschen Glühstrümpfe herstammten, nicht in Abrede gestellt werden konnte, gingen die beiden Forscher zur Untersuchung der in natürlichen Höhlen abgeschlossenen Luftmassen über. Solche mußten, wenn sie lange in demselben Raum stagniert hatten, das Maximum der Leitfähigkeit längst erreicht haben. Außerdem boten Messungen in Höhlen noch den bei Untersuchungen mit dem Zerstreuungsapparat recht wesentlichen Vorteil, daß wegen der Größe der abgeschlossenen Luftmenge die Verhältnisse denen in der freien Atmosphäre ähnlicher wurden.

Die von Elster und Geitel¹⁾ in der Baumannshöhle im Harz vorgenommenen Untersuchungen bestätigten ihre Erwartungen. Die Leitfähigkeit der Höhlenluft war etwa 3 mal größer als die der atmosphärischen. Ebenso stark ionisiert erwies sich nach Untersuchungen der genannten Forscher, die später von Ebert²⁾ u. a. bestätigt wurden, die Luft in Kellerräumen, die längere Zeit hindurch gut abgeschlossen geblieben waren.

Die untersuchten abgeschlossenen Luftmengen verhielten sich demnach so, als ob in ihnen selbst oder in den sie umgebenden Wänden geringe Spuren radioaktiver Substanzen zugegen wären, und es erschien Elster und Geitel daher nicht unmöglich, daß etwa die bekannten radioaktiven Elemente überall, wenn auch nur spurenweise, verbreitet wären, oder daß die Radioaktivität eine Eigenschaft sei, die in geringem Maße all den Stoffen, welche die Wände der Gefäße und Höhlen bildeten, zukomme.

War wirklich eine von den Wänden der Keller und Höhlen ausgehende Becquerelstrahlung die Ursache der Steigerung der Ionisation in diesen Räumen, so mußte die abnorme Aktivität sich auch in derjenigen Luft nachweisen lassen, welche in den kleinsten Hohlräumen und kapillaren Spalten des Erdreiches eingeschlossen ist. Denkbar wäre allerdings auch, daß die normale Aktivität eingeschlossener Luftmassen aus irgend welchen Gründen mit dem Volumen sich steigert, so daß also die größere Aktivität der

1) Phys. Zt. 2, 590, 1901.

2) H. Ebert, Phys. Zt. 4, 93, 1902.

Höhlenluft allein auf Rechnung des größeren Volumens der Luft zu setzen wäre. Der Versuch entschied zugunsten der ersteren Auffassung¹⁾. Ein Draht, der in einem noch ungebrauchten, 7 cbm enthaltenden, 3 Wochen lang verschlossen gehaltenen Dampfkessel mit einer Ladung von —2000 Volt exponiert wurde, nahm in 2 Stunden keine nachweisbaren Mengen von radioaktivem Niederschlag auf, während sich Luft, die aus der Erde aufgesaugt wurde, sehr stark radioaktiv erwies. Die Entnahme der Bodenluft geschah in folgender Weise: Mit einer dünnen Eisenstange wurde ein 1½ m tiefes Loch in weiche Gartenerde getrieben und eine Glasröhre von entsprechender Länge hineingesenkt, aber so, daß sie nicht völlig bis zum unteren Ende des Kanals hinabreichte. Die Erde wurde dann an den Seiten angedrückt, festgetreten und, um besseren Anschluß an die Röhre zu bewirken, mit Wasser oberflächlich angegossen. Das herausragende Ende der Röhre wurde durch einen Gummischlauch mit der Glocke verbunden, unter welche das Elektroskop mit aufgesetztem Zerstreuungskörper stand. Zwei in den Hals oder die Seiten dieser Glas- oder Metallglocke eingesetzte Röhren mit Hähnen gestatteten den Ein- und Austritt von Gas.

Natürlich kann man auch andere Anordnungen (s. S. 171) zur Untersuchung der Ionisation von Gasen gebrauchen. Man läßt entweder mit Hilfe einer Saugflasche die Bodenluft direkt in das Untersuchungsgefäß eintreten oder saugt dieselbe erst in ein Gasometer und treibt aus diesem abgemessene Mengen der Luft in das Untersuchungsgefäß. Diese Methode, wobei als Gasometer Gefäße der verschiedensten Art verwendet werden können, wenn dieselben nur durch passende Öffnungen das Ein- und Ausfließenlassen von Wasser gestatten, ist besonders dann praktisch, wenn sich das Untersuchungsgefäß nicht an den Ort der Entnahme der Bodenluft selbst transportieren läßt. Für die Entnahme der Luft aus dem Boden hat die Firma Günther & Tegetmeyer praktische, mit Schlauchansatz und Bohrer verbundene Messingrohre konstruiert.

Schon die ersten Versuche von Elster und Geitel ergaben für Bodenluft eine Leitfähigkeit vom 30 fachen Betrag derjenigen der Atmosphäre. Und zwar nahm auch nach beendigtem Einleiten der Bodenluft die Leitfähigkeit unter der Glocke noch eine Zeit-

1) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zt. 3, 574, 1902.

lang zu, ein Beweis, daß diese erhöhte Leitfähigkeit durch eine radioaktive Emanation verursacht wurde. Es gelang auch Elster und Geitel, den direkten Beweis für das Vorhandensein einer solchen zu führen, indem sie unter die Glocke, während Bodenluft durchgeleitet wurde, einen auf ein hohes negatives Potential geladenen Draht brachten. Derselbe erwies sich nach dem Herausnehmen aus der Bodenluft deutlich radioaktiv.

Vervollständigt wurden diese Untersuchungen von Ebert und Ewers¹⁾. Diese beraubten die Luft ihrer aus dem Boden mitgebrachten Ionen, indem sie das Gas durch das starke elektrische Feld eines Zylinderkondensators streichen ließen. 3 Stunden nach dem Eintreten unter die Glocke hatte die so behandelte Luft ihre hohe Leitfähigkeit infolge der in ihr enthaltenen, elektrisch neutralen, Emanation wieder erreicht. Wurde Zimmerluft unter die Glocke geleitet, unter der längere Zeit Bodenluft gestanden hatte, so nahm auch die erstere eine erhöhte Leitfähigkeit an, offenbar unter der Wirkung des radioaktiven Niederschlages, der sich auf den Wänden des Gefäßes gebildet hatte. Die so erworbene Leitfähigkeit sank allmählich auf den normalen Wert der Zimmerluft,

Die Geschwindigkeit, mit der die Aktivität der Emanation selbst als auch die des induzierten Niederschlages abnahm, stimmte mit der der Radiumemanation resp. -Induktion überein.

Die Bodenluft behielt ihre Aktivität bei, auch wenn ihr die Kohlensäure und der Wasserdampf, welche beide derselben stets beigemischt sind, durch passende Absorptionsmittel entzogen wurden. Erhitzen der Luft auf die Temperatur der Rotglut verminderte zwar die Aktivität, zerstörte sie aber nicht vollständig; bei diesem Erhitzen wurde das in der Bodenluft stets vorhandene Methan zerstört, doch kann dieser Umstand nicht die Verminderung der Aktivität herbeiführen, denn frisch bereitetes Methan ist, wie besondere Versuche lehrten, inaktiv.

Eine Absonderung der Emanation gelang Ebert²⁾ aber auf andere Weise. Mit der Luft kondensiert sich in der Lindeschen Maschine auch die in ihr enthaltene Emanation. Die Wirksamkeit klingt aber bei dieser Temperatur viel langsamer ab, als die Luft selbst verdampft; man kann daher die flüssige Luft mit Emanation anreichern. Erst bei einer Temperatur, die höher liegt als der

1) H. Ebert und P. Ewers, Phys. Zt. 4, 162, 1903.

2) H. Ebert, Münchener Ber. 33, 133, 1903.

Verdampfungspunkt der flüssigen Luft, nämlich bei -150° , geht auch die Emanation in den umgebenden Gasraum über und übt dort ihre ionisierende Wirkung aus. Fast gleichzeitig zeigten Rutherford und Soddy, daß Radiumemanation sich ebenso verhält, womit ein neuer Beweis für die Identität der beiden Emanationen geliefert war. Durch besondere Versuche wurde auch festgestellt, daß die durch die Verdampfungsrückstände der flüssigen Luft bewirkte Zerstreung nicht proportional dem Gehalt derselben an Edelgasen war. Die Vermutung, daß die radioaktive Emanation mit diesen identisch ist, erschien damit ausgeschlossen.

Die ersten Beobachter hatten gefunden, daß die Aktivität der Bodenluft mit derselben Geschwindigkeit wie die Radiumemanation abklingt. Nachdem W. H. Bumstead nachgewiesen hatte, daß sich in der Atmosphäre Zerfallsprodukte des Thoriums finden, lag es nahe, solche auch in der Bodenluft zu suchen. Bei der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation — die Halbwertsperiode ist 54 Sekunden — versprach die Untersuchung von aus dem Boden aufgesaugter Luft keinen Erfolg. Auf Veranlassung von Bumstead verfuhr daher Dadourian¹⁾ in der Weise, daß er in ein kreisrundes Loch von 50 cm Durchmesser und 200 cm Tiefe einen 50 m langen Draht einführte, der auf einen zu einem Zylindermantel gebogenen Rahmen aufgewickelt war. Der Rahmen war isoliert an dem das Loch verschließenden Deckel befestigt. Der Draht wurde vermittlems einer Influenzmaschine 3 Stunden lang auf ein hohes negatives Potential geladen. Die Untersuchung des so aktivierten Drahtes ergab, daß die Aktivität langsamer abnahm als die der Radiuminduktion. Ungefähr 5 Stunden nach dem Unterbrechen der Ladung war die Aktivität des Drahtes auf 5 Proz. des Anfangswertes gesunken. Von da an nahm sie langsamer ab mit einer Halbwertsperiode von $10\frac{1}{2}$ Stunden, also gleich der der Thoriuminduktion. Aus der bekannten Abfallgeschwindigkeit der Aktivität der Thoriuminduktion und der 5 Stunden nach Loslösung des Drahtes von der ladenden Maschine beobachteten Thoriumaktivität kann man die zu jeder Zeit vorhandene Menge Thoriumaktivität und damit durch Abziehen von der Gesamtaktivität die vorhandene Menge Radiuminduktion berechnen.

Die wirklich beobachteten Abfallkurven stimmen aber mit den unter der Voraussetzung, daß nur Radium- und Thorium-

1) H. M. Dadourian, Phys. Zt 6, 98, 1905; Americ. Journ. of Sc. 19, 16, 1905.

induktion vorhanden ist, berechneten nicht überein; es scheinen in der Bodenluft noch geringe Mengen einer Emanation vorhanden zu sein, deren Zerfallsprodukte ihre Aktivität langsamer verlieren als die der Radiumemanation, also vielleicht Aktiniumemanation. Zu demselben Resultat sind Bumstead, Gockel und Jaufmann für die atmosphärische Luft gekommen (s. S. 187). Die Thoriuminduktion lieferte bei den Versuchen von Dadourian etwa 15 Proz. der gesamten Aktivität.

Daß die Aktivität der Bodenluft je nach ihrer Herkunft verschieden ist, haben schon Elster und Geitel gefunden. In Wolfenbüttel, Göttingen und München erwies sich die Bodenluft stark aktiv, schwach dagegen in Blankenburg im Harz, Würzburg und Wilhelmshöhe bei Kassel. Indessen sind diese und zahlreiche andere Angaben über die Radioaktivität der Bodenluft nicht ohne weiteres unter sich vergleichbar. Zum Teil wurde die Radioaktivität der Bodenluft dadurch bestimmt, daß man die Zerstreuung in Kellern und natürlichen Höhlen maß. Auch wenn man davon absieht, daß die Messungen mit dem Elster- und Geitelschen Zerstreuungsapparat kein genaues Maß der Ionisation geben, ist zu bemerken, daß Ionisation und Emanationsgehalt der Luft auch in geschlossenem Raume nicht immer parallel gehen. Die Zahl der mit den üblichen Apparaten nachweisbaren Ionen wird durch hohe relative Feuchtigkeit und den Staubgehalt der betreffenden Atmosphäre stark herabgesetzt. Im allgemeinen wird man daher in Kellern und Bergwerken Werte der Ionisation finden, die niedriger sind als die bei gleichem Emanationsgehalt in trockenen und staubfreien Räumen beobachteten.

Als Verfasser die Versuche Elsters und Geitels im Keller des hiesigen physikalischen Instituts und in Molassehöhlen wiederholte, konnte er eine erhöhte Leitfähigkeit der eingeschlossenen Luft nicht nachweisen¹⁾. Als später der Zerstreuungsapparat durch den Ebertschen Ionenzähler ersetzt wurde, war das Ergebnis dasselbe. Als dagegen der Ebertsche Apparat in eine nur wenige Kubikmeter große Aushöhlung eines Molassefelsens gebracht wurde, die ihrer ganzen Höhe und Breite nach mit der freien Atmosphäre kommunizierte, wurden Ionenzahlen gefunden, die dreimal so hoch waren als die gleichzeitig in der freien Atmosphäre beobachteten. Die abweichenden Resultate der ersten Versuche dürften demnach veranlaßt sein durch den Umstand, daß in der feuchten Keller- und Höhlenluft die Ionen durch Anlagerung von Wasserpartikelchen so viel an Beweglichkeit eingebüßt hatten, daß sie mit den angewandten Apparaten nicht mehr nachgewiesen werden

1) A. Gockel, Phys. Zt. 4, 604, 1903.

konnten, während in der offenen trockeneren Höhle eine solche Verringerung der Beweglichkeit nicht stattfand.

Es ist daher nicht zu billigen, daß namentlich in der französischen Literatur die Ausdrücke Radioaktivität und Ionisation als gleichbedeutend gebraucht werden.

Besser vergleichbare Werte erhält man dadurch, daß man ein abgemessenes Quantum Bodenluft, welches durch Hindurchstreichen durch passende Stoffe wie Chlorcalcium, Schwefelsäure usw. getrocknet wurde, in ein geschlossenes Gefäß leitet und die dort erzeugte Ionisation mißt. Wie oben schon bemerkt, erreicht die Ionisation in einem solchen Gefäße erst einige Stunden nach dem Einlassen der Bodenluft ihren Maximalwert. Während dieser Zeit bildet sich auf den Gefäßwänden ein radioaktiver Niederschlag aus. Man kann den von der Strahlung desselben herrührenden Teil der Ionisation eliminieren, wenn man die Bodenluft aus dem Gefäß ausbläst oder beim Arbeiten mit einer Glocke, dieselbe von der Unterlage abhebt, nach Entfernen der Bodenluft mindestens $\frac{1}{2}$ Stunde lang das Abklingen der induzierten Aktivität in dem Gefäß beobachtet, und aus der so erhaltenen Kurve den Wert für den Zeitpunkt Null, d. h. den Zeitpunkt der beginnenden Entleerung des Gefäßes extrapoliert. Dieser Wert, sowie die vor dem Einleiten der Bodenluft in dem Gefäß vorhandene Ionisation muß von dem beobachteten Maximalwert in Abzug gebracht werden. Am besten gibt man den so korrigierten, von der in einem Liter Bodenluft vorhandenen Emanationsmenge hervorgerufenen Sättigungsstrom nach einem Vorschlag Maches in elektrostatischen Einheiten und zwar, um unnötige Nullen zu vermeiden, multipliziert mit 10^3 an. Bezeichnet dV den in Volt gemessenen Potentialabfall per Minute, den die aus n Liter Luft stammende Emanation in einem Apparat von der Kapazität C hervorruft, so ist die Stromstärke, d. h. die pro Sekunde transportierte Elektrizitätsmenge $e = \frac{dV \times C}{300 \times n \times 60}$.

So fand Gockel in Freiburg (Schweiz) die Radioaktivität eines Liters Bodenluft daselbst zu $0,2 - 0,75 \times 10^{-3}$ E. S. E., Ebert in München zu $1,1 \times 10^{-3}$ E. S. E.

Den Einfluß meteorologischer Faktoren auf den Gehalt der Bodenluft an Emanation hat zuerst Brandes¹⁾ in Kiel untersucht. Seine Beobachtungen erstrecken sich leider nur auf 5 Frühjahr- und Sommermonate. Das wichtigste Resultat seiner Untersuchung,

1) H. Brandes, Inaugural-Dissertation. Kiel 1905.

auf das besonders Ebert mit Nachdruck hingewiesen hat, ist folgendes: Andauerndes Sinken des Barometers während eines oder mehrerer Tage war durchweg mit einer entsprechend langsamen Steigerung des Emanationsgehaltes verbunden und umgekehrt das Steigen des Luftdrucks mit der entsprechenden Abnahme des Emanationsgehaltes der Bodenluft. Dagegen war eine Abhängigkeit des Emanationsgehaltes vom Barometerstande nicht sicher nachzuweisen. Schnellen und starken Änderungen des Luftdrucks vermochten die im umgekehrten Sinne stattfindenden Schwankungen des Emanationsgehaltes nicht sofort zu folgen, so daß oft noch hoher Emanationsgehalt beobachtet wurde, wenn der Luftdruck schon wieder hohe Werte erreicht hatte und umgekehrt. Kaehler¹⁾, der später am gleichen Ort noch weitere Bestimmungen vornahm, erhielt sogar im Mittel bei steigendem Barometer höhere Werte als bei sinkendem. Vor allem wird, wie auch aus eigenen Beobachtungen des Verfassers²⁾ hervorgeht, der Emanationsgehalt der Bodenluft beeinflußt durch alle Änderungen der Durchlässigkeit des Bodens. Niederschläge, Schneeschmelze, Gefrieren des Bodens erhöhen den Emanationsgehalt, der letztere Vorgang in besonders hohem Maße. Eine Schneedecke scheint nach meinen Beobachtungen auf den Emanationsgehalt der Bodenluft keinen Einfluß zu haben, wohl aber sammelt sich in dem lockeren Schnee selbst Emanation an, besonders bei sinkendem Luftdruck.

Nach den Messungen von Brandes nimmt in dem Kieler Sandboden der Emanationsgehalt bis zu einer Tiefe von 2 m beständig zu, von da an bleibt er konstant. Auch die zeitlichen Schwankungen machen sich in dieser Tiefe nicht mehr bemerkbar.

Der absolute Gehalt der Bodenluft an Emanation läßt sich aus den Zahlen von Brandes nicht ohne weiteres entnehmen, da er die elektrische Kapazität der von ihm benutzten Gefäße nicht angibt. Nach den angegebenen Dimensionen und dem Vergleich mit ähnlich gebauten Apparaten schätze ich dieselbe zu 20 cm, woraus sich der gesuchte Emanationsgehalt zu 0,8 — 1 Macheinheiten berechnet.

Nachdem R. v. Traubenberg³⁾ nachgewiesen hatte, daß die Bodenluftemanation, dem Henryschen Gesetz folgend, von Wasser

1) Kaehler, Meteor. Zt. **23**, 253, 1906.

2) A. Gockel, Phys. Zt. **9**, 304, 1908.

3) R. v. Traubenberg, Phys. Zt. **5**, 130, 1904.

absorbiert wird, lag es nahe, solche auch im Grundwasser zu suchen. Tatsächlich erwies sich auch das Wasser einiger von Jaufmann¹⁾ untersuchter Brunnen stets radioaktiv, doch war der Betrag der Aktivität sehr starken Wechseln unterworfen. Die Ursache derselben sieht Jaufmann in der Veränderung des Luftdruckes. Besonders reich an Emanation erwies sich Wasser, das sich unter einer gefrorenen Bodenschicht angesammelt hatte. Stark radioaktiv ist auch, wie schon Elster und Geitel fanden, die an verschiedenen Orten dem Boden entströmende Kohlensäure.

2. Radioaktivität der Gesteine. Bevor wir uns mit solchen Mofetten und den Mineralquellen eingehender beschäftigen, wollen wir uns der Frage zuwenden: Woher rührt die im Boden sich vorfindende radioaktive Emanation? Wir verfolgen zum Zweck der Beantwortung dieser Frage den Gedankengang Elsters und Geitels. Zwei Annahmen schienen diesen Forschern möglich: Entweder war an eine noch unbekannte Fähigkeit stagnierender Luft zu denken, solche Emanation von selbst zu bilden und in sich aufzuspeichern oder an ein Hereindiffundieren der letzteren aus den einschließenden Wänden und dem Erdboden.

Die Erfahrung wies auf die letztere Alternative hin. Die Leitfähigkeit der Luft in Kellern und Höhlen zeigte einmal, wie schon oben bemerkt wurde, an verschiedenen Orten ganz beträchtliche Unterschiede, die nur durch den Einfluß der umgebenden Wände zu erklären waren. Ebenso verschieden erwies sich die Aktivität der an verschiedenen Orten aus dem Erdreich aufgesaugten Luft. Elster und Geitel untersuchten nun das Erdreich selbst, indem sie eine mit Gartenerde gefüllte Schale zusammen mit dem Zerstreungsapparat unter eine Glocke brachten. Es zeigte sich auch sofort eine Zunahme der Ionisierung der abgeschlossenen Luftmenge, und wie zu erwarten war, stieg die Ionisation im Laufe von 2—3 Tagen bis zu einem Maximalwert von etwa dem Dreifachen des normalen an. Auch 8 Monate nach Entnahme der Erdproben konnte eine Verringerung der Aktivität nicht festgestellt werden. Wurden einige Kilo Erde in ein geschlossenes Gefäß gebracht, so konnte an einem eingeführten, auf —2000 Volt geladenen Draht nach einigen Stunden auch die induzierte Aktivität nachgewiesen werden.

1) J. Jaufmann, Meteor. Zt. 22, 102, 1905.

Aus dem Fangoschlamm, einem Absatz der heißen Quellen von Battaglia in Oberitalien konnten Elster und Geitel den radioaktiven Stoff konzentrieren, indem sie die Masse mit heißer Salzsäure behandelten, zu der salzsauren Lösung Chlorbaryum setzten und dann mit Schwefelsäure ausfällten. Der so erhaltene Niederschlag von schwefelsaurem Baryum erwies sich, auf gleiche Gewichtsmenge bezogen, 100—160 mal radioaktiver als das Ausgangsmaterial.

Nach der von Elster und Geitel angegebenen Methode ist teils von diesen selbst, teils von andern Forschern eine Reihe von Gesteinen und Erdarten untersucht worden.

Eine Übersicht der bis zum Jahre 1905 ausgeführten Untersuchungen gibt v. dem Borne im Jahrbuch der Radioaktivität ¹⁾.

Vergleichbar wurden die von den einzelnen Forschern gegebenen Zahlen dadurch, daß die Radioaktivität der zu untersuchenden Substanzen mit einer anderen von konstant bleibendem Radiumgehalt verglichen wurde. Allerdings bietet dieser Weg nur einen Notbehelf. Man darf die von einer Substanz bewirkte Ionisation nicht ohne weiteres als ein Maß der in ihr enthaltenen Radiummenge ansehen, da sich außer dem Radium auch noch die verschiedenartigsten andern radioaktiven Substanzen in den untersuchten Erdproben vorfinden können; so ist z. B. im Fango und in der Ackererde von Capri Actinium nachgewiesen worden ²⁾.

Ferner sind die Absorptionsvorgänge in dem Gas und die durch die Absorption bewirkte Ionisation nicht nur von der Art der Strahlung und dem Emanationsvermögen der zu untersuchenden Substanz, sondern auch von der Form des benutzten Gefäßes und der Lage des radioaktiven Körpers in demselben, und weil die Strahlen auch in diesem selbst absorbiert werden, auch von der Dicke der angewandten Schicht und von dem Zustand der Verkleinerung abhängig.

Die in der Literatur mitgeteilten, von verschiedenen Forschern herrührenden Zahlen ergeben also nur ein ungefähres Maß der Radioaktivität der betreffenden Substanzen. Als Vergleichsmaterial wird nach dem Vorschlag von Elster und Geitel der in den Apotheken erhältliche Fango gewählt. Die Uransalze, die allenfalls noch in Betracht kommen könnten, sind mehr als 100 mal

1) Band II, 77, 1905.

2) F. Giesel, Phys. Zt. 6, 205, 1905.

radioaktiver als die meisten Erdarten und eignen sich daher nicht gut zum Vergleich mit diesen, dagegen kann nach einem Vorschlag von Vicentini uranhaltiges Glas (F. 3738 des Glaswerkes von Schott u. Genossen, Jena) verwendet werden.

Als allgemeines Resultat hat sich aus den nach dem Verfahren von Elster und Geitel ausgeführten Beobachtungen ergeben: Radioaktiv sind vor allen die tonhaltigen Verwitterungsgesteine, inaktiv erscheinen dagegen gesunde Gesteine, auch frische Laven. Die Zersetzungsprodukte vulkanischer Gesteine sind im allgemeinen stärker radioaktiv als die sedimentärer. Von Einzelheiten möge erwähnt werden die auffallend hohe Aktivität eines Höhlenlehms von Capri (3,3 Fangoeinheiten gegenüber 0,1—1 der anderen untersuchten Erdarten). Sand erweist sich fast durchweg viel schwächer radioaktiv als Ton, auch da, wo beide Gesteinsarten an demselben Orte vorkommen.

Daß gesunde Felsarten nur eine sehr geringe Zunahme der Leitfähigkeit der Luft in dem Untersuchungsapparat bewirken, mag seinen Grund darin haben, daß die kompakte Natur des Gesteins, auch wenn es stark verkleinert wird, den Austritt der Emanation verhindert.

Strutt¹⁾ hat deshalb ein von dem Elster und Geitelschen abweichendes Verfahren eingeschlagen. Die fein gepulverten Gesteine wurden durch Glühen mit Kali-Natronkarbonat aufgeschlossen, die Schmelze mit heißem Wasser ausgezogen, und der Rest in Salzsäure gelöst. Die Lösung blieb mindestens eine Woche lang sich selbst überlassen, in welcher Zeit sie sich mit Emanation sättigen konnte. Dann wurde die emanationshaltige Luft durch Kochen ausgetrieben und durch geeignete Trockenvorrichtungen hindurch in das Untersuchungsgefäß, gewöhnlich ein vorher luftleer gemachtes Wilsonsches Elektroskop, geleitet. Als Vergleichsmaterialien wurden Mineralien von bekanntem Urangehalt verwendet. Unter der Voraussetzung, daß einem Gramm Uran als Muttersubstanz $3,8 \times 10^{-7}$ g Radium entsprechen, berechnet sich der mittlere Radiumgehalt der von Strutt untersuchten Gesteine zu $2,5 \times 10^{-3}$ mg im Kubikmeter. Am radiumreichsten erwiesen sich die Granite, am ärmsten die Basalte. Auffallend reich waren auch einige Gesteine aus dem Simplontunnel. Die Extremwerte sind 0,30 und $4,78 \times 10^{-3}$ für vulkanische, 0,12 und $2,92 \times 10^{-3}$ für sedimentäre Gesteine. Da nach

1) Proc. Roy. Soc. A, 77, 474, 1906; Nature 78, 455, 1908.

Ramsay aus der Radiumemanation sich Helium und Argon bilden kann, so muß hier auch erwähnt werden, daß nach Strutt¹⁾ die meisten Gesteine Spuren von den genannten Gasen enthalten.

Eve²⁾ hat die Radioaktivität verschiedener Felsarten auch vermittels ihrer γ -Strahlung gemessen. Er kam zu demselben Resultat wie Strutt.

Blanc³⁾ bestimmte die in den obersten Bodenschichten in Rom enthaltene Thoriummenge, indem er die Menge der Thoriuminduktionen, welche sich innerhalb einer bestimmten Zeit über einer gegebenen Bodenfläche ansammelten, verglich mit der Menge von Induktionen, die sich unter denselben Umständen über einem Gemisch von Thoriumhydroxyd und Erde auffangen ließen. Unter der Annahme, daß das Thorium im Boden in der Form des Hydroxyds, also derjenigen Form enthalten ist, in der es das stärkste Emanationsvermögen besitzt, findet er, daß im Gramm Gartenerde in Rom 0,0000145 g Thor enthalten sind.

3. Radioaktive Emanation in Quellen. Der Umstand, daß die dem Boden entströmende Kohlensäure sich als stark radioaktiv erwies, veranlaßte Elster und Geitel darauf aufmerksam zu machen, daß wohl auch die von Thermalquellen mitgeführten Gase eine solche Emanation enthalten müßten. Tatsächlich fanden auch ungefähr zur gleichen Zeit J. J. Thomson⁴⁾ in Cambridge und Pochettino und Sella⁵⁾ in Rom, daß Luft beim Hindurchperlen durch Wasser ionisiert wurde. Himstedt⁶⁾ zeigte dann, daß es sich hier nicht bloß um eine dem Lenardeffekt ähnliche Wirkung des Hindurchperlens handelt, sondern daß Quellwasser eine Emanation enthalten. Daß diese in der Hauptsache Radiumemanation war, konnte Himstedt aus der Kondensationstemperatur zeigen. Der Umstand, daß man die Wirkung der Heilquellen zum Teil in der in ihnen enthaltenen Emanation sucht, war die Ursache, daß so ziemlich alle bekannten Heilquellen auf ihren

1) Nature, **75**, 271, 1907.

2) Eve, Beibl. **30**, 983, 1906.

3) G. A. Blanc, Rendic. R. Accad. dei Lincei **27**, 101, 1908.

4) J. J. Thomson, Nature **67**, 609, 1902; Phil. Mag. **4**, 352, 1902.

5) A. Pochettino ed A. Sella, Nuov. Cimento **4**, 203, 1902; Rendic. R. Accad. dei Lincei **11**, 527, 1902.

6) F. Himstedt, Ber. d. Naturf. Gesellsch. Freiburg (Breisgau) **14** 181, 1903; Phys. Zt. **5**, 210, 1904; Ann. d. Phys. **13**, 573, 1904.

Emanationsgehalt hin geprüft wurden¹⁾. Am einfachsten verfährt man zu diesem Zweck in der Weise, daß man mittels eines Gummigebläses ein abgegrenztes Luftquantum durch ein gemessenes Volumen des zu untersuchenden Wassers und eine Glocke, unter welcher sich ein mit einem Elektrometer verbundener Zerstreuungskörper befindet, zirkulieren läßt. Nach etwa 20 Minuten ist Gleichgewicht erreicht, und man erhält nach der auf S. 165 angegebenen Weise den Emanationsgehalt in Mache-Einheiten. Abzuziehen ist von dem gemessenen Wert, wie dort dargelegt wurde, die Ionisierung, die von dem auf den Wänden der Glocke entstandenen radioaktiven Niederschlag erzeugt wurde. Besondere Instrumente für die Bestimmung des Emanationsgehaltes von Wasser sind angegeben von Sieveking²⁾, Schmidt³⁾, v. dem Borne⁴⁾.

Allgemeine Resultate, insbesondere ein Zusammenhang zwischen Emanationsgehalt und dem geologischen Aufbau der Schichten, denen die Quelle entströmt, haben sich bis jetzt nicht ergeben. Aktiv sind nicht nur heiße, sondern auch kalte Quellen. Im Taunus fand sich sogar eine Reihe kalter Quellen, die aktiver sind als benachbarte Thermalquellen, ebenso in Plombières. Auch nahe beieinander liegende Quellen weisen oft große Unterschiede in ihrem Emanationsgehalt auf.

Steigen aus einer Quelle Gase auf, so werden dieselben die Emanation auswaschen, es bleibt nur noch ein kleiner Teil im Wasser zurück; der Partialdruck in Gas und Wasser ist durch den Absorptionskoeffizienten der Emanation gegeben.

Aus der bekannten Eigenschaft der Emanation, sich in Edelgase umzuwandeln, folgt, daß die emanationshaltigen Quellen auch die letzteren Gase enthalten müssen, was die Beobachtung bestätigt hat.

Inaktiv sind alle an der Oberfläche fließenden Wasser, da ihre Emanation zerfällt oder an die Atmosphäre abgegeben wird,

1) Eine Zusammenstellung der Literatur bis zum Jahre 1906 findet man bei J. v. Sury, Über die Radioaktivität einiger schweizerischer Mineralquellen. Inaugural-Dissertation Freiburg (Schweiz) 1906; viele Angaben auch bei F. Henrich, Zt. f. Elektrochemie **13**, 393, 1907.

2) Engler u. Sieveking, Phys. Zt. **6**, 700, 1905.

3) W. H. Schmidt, Phys. Zt. **7**, 209, 1906.

4) G. v. dem Borne, Untersuchungen über die Abhängigkeit der Bodenluft von geologischen Faktoren. Habilitationsschrift, Breslau 1905.

ohne daß Nachlieferung stattfindet. Ebenso ist Gletscherwasser nach Untersuchungen von Wulf und dem Verfasser inaktiv.

Zu denjenigen Quellen, welche den stärksten Gehalt an Radiumemanation aufweisen, gehören unter anderen die von Gastein, Baden-Baden, Plombières, Lavey les bains (Schweiz). Wenn auch die Luft in der Umgebung mancher Quellen durch die ausströmenden Gase stark ionisiert ist, so dürfte doch im Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre die in diesen Quellen ausströmende Emanation eine geringe Rolle spielen. Es mögen deshalb nur noch einige kurze Bemerkungen folgen.

Während sich das Wasser der meisten Thermalquellen als mehr oder minder emanationshaltig erweist, ist in seltenen Fällen Radiumsalz selbst in Quellen gefunden worden, so von Dorn¹⁾ in Karlsbad, Adams²⁾ im Leitungswasser von Montreal und von Gockel in den heißen Quellen des Simplontunnels. Auch diese Radiumspuren verraten ihre Anwesenheit nur dadurch, daß sie in dem Wasser wieder von neuem geringe Mengen Emanation erzeugen, so daß ein solches Wasser auch bei längerer Aufbewahrung in geschlossenen Gefäßen seine Emanation nicht vollständig verliert. Thoriumemanation abgebende Substanzen scheinen nach den Untersuchungen von Jentzsch³⁾ im Wasser der Kissinger Heilquellen gelöst zu sein.

Da die gasförmige Radiumemanation bei einer mittleren Lebensdauer von mehreren Tagen sich in Klüften, Kapillaren und Spalten der Gesteine verbreiten kann, also auch entfernt von ihrem Entstehungsort anzutreffen ist, so bietet der Umstand, daß in den meisten Wässern nur die Emanation gefunden wurde, der Erklärung keine Schwierigkeiten; wir werden aber andererseits wohl annehmen dürfen, daß außer den oben genannten Quellen auch noch andere das Radium selbst enthalten, jedoch in so geringer Menge, daß die erzeugte Emanation nicht nachweisbar ist. Wo die Quelle jedoch feste Bestandteile aussondert, wird sich unter diesen auch das im Wasser gelöste Radium finden müssen, und tatsächlich ist ja auch, von den Uran- und Thormineralien abgesehen, ein Quellschlamm, der Fango, das erste entdeckte stark radioaktive Produkt. Eine Übersicht über die

1) E. Dorn, Abh. naturf. Gesellsch. Halle **25**, 107, 1904.

2) E. P. Adams, Phil. Mag. **6**, 563, 1903.

3) F. Jentzsch, Phys. Zt. **8**, 887, 1907.

Radioaktivität einiger Quellabsätze findet man bei v. dem Borne¹⁾. Eine Reihe Absätze aus schweizerischen Mineralquellen hat später v. Sury²⁾ untersucht. Bemerkenswert ist die starke Aktivität des Schlammes einiger Quellen von Baden-Baden (Schlamm der Ursprungquelle ist 100 mal stärker aktiv als der Fango) und Kreuznach. Es scheinen demnach Granit und Porphyry am stärksten Radium in das sie durchfließende Wasser abzugeben.

Thoriumemanation kann, weil sie nur eine mittlere Lebensdauer von wenigen Minuten besitzt, in den Quellwässern in erheblicher Menge nicht erwartet werden, doch deutet die ziemlich weite Verbreitung der Thoriumemanation in der Bodenluft daraufhin, daß das Thorium spurenweise in den meisten Gesteinen vorkommt. Tatsächlich fanden dann auch Elster und Geitel bei ihren ersten Untersuchungen des Schlammes der Badener Ursprungquelle darin einen Stoff, der Thoriumemanation abgab, aber stärker aktiv war, als das Thorium selbst. Nachdem mittlerweile Hahn den radioaktiven Bestandteil des Thoriums im Radiothor isoliert hatte, wiesen Engler und Sieveking³⁾ die Identität dieses Stoffes mit dem nach der Elster- und Geitelschen Methode aus dem Schlamm der Ursprungquelle abgesonderten radioaktiven Bestandteile nach. Später fanden Elster und Geitel⁴⁾ Radiothorium auch im Schlamm der Badequelle von Kreuznach. Thoriumhaltig sind auch nach Vermutungen v. dem Borne, die Verfasser später bestätigen konnte, einige der im Simplontunnel entspringenden Quellen.

Da Kohlenwasserstoffe ein stärkeres Absorptionsvermögen für Radiumemanation besitzen, so muß Rohpetroleum ebenfalls solche Emanation enthalten. Himstedt hat auch tatsächlich solche in elsässischem Petroleum und Burton in dem von Petrolia (Ontario) nachgewiesen. Elster und Geitel⁵⁾ fanden ferner, daß der feine Schlamm, den das Rohpetroleum von Oelheim bei Peine mit sich führt und im Klärbassin fallen läßt, seine Aktivität ausschließlich dem Radiothor verdankt. Auch das von Burton untersuchte Petroleum scheint neben viel Radiumemanation Spuren einer solchen zu enthalten, die beständiger als die erstere ist.

1) v. dem Borne, Jahrb. für Radioakt. **2**, 107, 1909.

2) v. Sury l. c.

3) Zt. f. Elektr. **11**, 719, 1905 u. Zt. f. anorg. Ch. **53**, 1, 1907.

4) Phys. Zt. **7**, 445, 1906.

5) Phys. Zt. **5**, 511, 1904.

4. Seewasser. Aus der Tatsache, daß die meisten Gesteine mehr oder minder radiumhaltig sind, und der Löslichkeit der Radiumsalze folgt, daß auch das Meerwasser Radium enthalten muß. Die von Strutt¹⁾, Eve²⁾, Joly³⁾ gefundenen Werte der Radioaktivität schwanken je nach der angewandten Methode und der Herkunft des Wassers zwischen 0,0003 und $0,0400 \times 10^{-12}$ g Radium im Gramm Seewasser. Den angegebenen niedersten Wert erhielt Eve für Wasser, das mitten auf dem Atlantischen Ozean zwischen Kanada und Island geschöpft war, den höchsten Joly für Wasser von der felsigen irischen Küste bei Valencia. Da indessen Wasserproben derselben Herkunft, nach verschiedenen Methoden untersucht, auch verschiedene Werte lieferten, und andererseits Joly für Wasser von der verschiedensten Herkunft (Atlantischer Ozean, Golf von Biscaya, Arabischer See, Irischer Kanal), von denen einige in der nächsten Nähe der Küste, andere aber 400 Seemeilen vom Lande entfernt, geschöpft waren, Werte fand, die nur zwischen 0,01 und 0,004 schwankten und keine Abhängigkeit des Radiumgehaltes von der Entfernung vom Lande erkennen ließen, so erscheint es doch zweifelhaft, ob man aus den von Eve gefundenen Werten wirklich den Schluß ziehen darf, daß der Radiumgehalt des Seewassers nach der Mitte des Ozeans hin abnimmt. Auch wenn man den höchsten der gefundenen Werte als richtig annimmt, ist der Radiumgehalt des Seewassers immer noch 500 mal und der des Seesalzes 15 mal geringer als der einer gleichen Gewichtsmenge Sedimentärgesteine. Bemerkenswert ist, daß Joly einen allerdings sehr geringen Gehalt radioaktiver Emanation im Seewasser nachweisen konnte. Da wegen der Konvektionsströmung im Wasser und der Bewegung der Oberfläche die Emanation auch aus größeren Tiefen aus dem Wasser leichter in die Atmosphäre entweichen kann als aus dem Boden, so ergibt sich, daß der Gehalt der Atmosphäre an radioaktiver Emanation über dem Ozean nicht viel geringer zu sein braucht als über dem Land.

Tiefseesedimente enthalten nach Joly $0,6-51 \times 10^{-12}$ g Radium in Gramm Substanz. Die kalkreichsten Sedimente sind gleichzeitig die an Radium ärmsten.

In dem Wasser der Binnenseen konnte bis jetzt keine Emanation nachgewiesen werden.

1) J. Strutt, Proc. Roy. Soc. **78**, 150, 1907.

2) A. S. Eve, Phil. Mag. **13**, 248, 1907; Phys. Zt. **8**, 286, 1907.

3) I. Joly, Phil. Mag. **15**, 385, u. **16**, 194, 1908.

5. Radioaktivität der Atmosphäre. Schon bevor die Existenz einer radioaktiven Emanation in der Bodenluft sicher gestellt war, hatten die Analogien, welche die natürliche atmosphärische Luft hinsichtlich ihres elektrischen Leitvermögens mit Gasen zeigte, die mit radioaktiven Substanzen in Berührung gekommen waren, Elster und Geitel¹⁾ den Gedanken nahegelegt, nach der Anwesenheit einer Emanation in der Atmosphäre zu suchen. Sie setzten zu diesem Zwecke Drahtnetze und andere Körper mit positiver oder negativer Ladung von einigen Hundert bis einigen Tausend Volt der freien Luft aus und brachten sie dann unter eine Glasglocke, unter welcher der Zerstreungsapparat stand. Es ergab sich, daß negativ geladene Körper durch 1—2 stündige Exposition an der freien Luft die Fähigkeit erlangten, Gas und zwar sogar durch Aluminiumfolie hindurch zu ionisieren und durch Metallschablonen hindurch photographische Platten zu schwärzen. Damit war bewiesen, daß sich auf den exponierten Gegenständen Substanzen niederschlagen, welche eine Becquerelstrahlung ausstrahlen können. Diese Substanzen lassen sich von Kupferdrähten abwischen, am besten mit einem in Ammoniak getauchten Stück Leder; sie bleiben bei der Verbrennung dieses Leders in der Asche zurück.

Den ersten Mitteilungen der Herren Elster und Geitel folgte bald eine ausführliche Beschreibung des zur Gewinnung radioaktiver Stoffe aus der Atmosphäre angewandten Verfahrens²⁾. Ein etwa 10—20 m langer Kupferdraht von ungefähr 0,5 mm Durchmesser wird mittels eigens hierfür konstruierter gut isolierender Haken in der freien Atmosphäre mindestens 2 m über dem Erdboden ausgespannt. Vermittels einer Wasserinfluenzmaschine oder einer Hochspannungstrockensäule wird der Draht auf ein möglichst konstantes negatives Potential von 2500 Volt geladen. Die Ladung wird kontrolliert durch ein Braunschkes, mit Bernsteinisolierung versehenes Elektrometer. Nach zweistündiger Exposition ist das Maximum der Aktivierung erreicht, der Draht wird auf eine Trommel aus Drahtgeflecht gewickelt und in den auch unten verschlossenen Schutzzylinder des Zerstreungsapparates gebracht. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Zerstreungszyylinder seine Ladung verliert, gibt ein Maß für die Ionisierung der Luft in

1) Phys. Zt. **2**, 590, 1901.

2) Phys. Zt. **3**, 305, 1902 u. ebenda, **4**, 96, 1902,

dem GefaÙe und damit für die Aktivierung des Drahtes. Elster und Geitel haben mit diesem leicht zu transportierenden Instrumentarium selbst eine Reihe von Versuchen ausgeführt¹⁾. Die Aktivität der freien Luft wurde gleich 1 gesetzt, wenn nach zwei-stündiger Exposition ein Meter des exponierten Drahtes das Potential des Zerstreungskörpers in 1 Stunde um 1 Volt erniedrigte. Die in dieser Maßeinheit ausgedrückte, von Elster und Geitel mit A bezeichnete Größe, ist selbstverständlich von den Dimensionen des angewandten Zerstreungsapparates abhängig. Es zeigte sich aber später, wie wir sehen werden, daß die Größe A auch dann nicht als ein Maß für die Menge der in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Emanation angesehen werden kann, wenn die angewandten Apparate vollständig gleich gebaut sind und von derselben Firma (Günther & Tegetmeyer in Braunschweig) stammen.

Eine Verbesserung der von Elster und Geitel angewandten Isolierhaken hat der Verfasser²⁾ später angeben.

Mit positiver Ladung des exponierten Drahtes konnten Elster und Geitel zwar im Keller des Archivgebäudes zu Wolfenbüttel, nicht aber in der freien Luft meßbare Mengen radioaktiver Emanation erhalten, dagegen gelang dieses den Herren E. Sarasin und Tommasina³⁾ in Genf und Schenk in Halle.

Ausgedehntere Reihen von Messungen der Größe A , die hauptsächlich den Zweck verfolgten, die tägliche und jährliche Periode derselben, ihre Abhängigkeit von den einzelnen meteorologischen Faktoren und ihren Zusammenhang mit der Ionisierung der Atmosphäre festzustellen, sind von Elster und Geitel⁴⁾, Gockel⁵⁾, Rutherford und Allan⁶⁾, Saake⁷⁾, Simpson⁸⁾, Jaufmann⁹⁾ angestellt worden.

Die genannten Arbeiten führten zu dem Resultat, daß ein starker Einfluß der Örtlichkeit auf die Größe A existiert, eine

1) Phys. Zt. **4**, 526, 1903.

2) A. Gockel, Phys. Zt. **6**, 328, 1906.

3) Phys. Zt. **6**, 709, 1905; Archiv. d. sc. phys. et nat. **18**, 620, 1904.

4) Phys. Zt. **4**, 526, 1903.

5) Phys. Zt. **5**, 591, 1904; Archiv. d. sc. phys. et nat. **19**, 151, 1905; Met. Zt. **23**, 62, 1906.

6) Phil. Mag. **4**, 704, 1902; Phys. Zt. **3**, 225, 1902.

7) W. Saake, Phys. Zt. **4**, 626, 1903.

8) Phys. Zt. **6**, 270, 1905; Phil. Transact. London, **205**, 61, 1905; Met. Zt. **21**, 226, 1904.

9) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **24**, 337, 1907.

Abhängigkeit von der Jahreszeit, Temperatur, Feuchtigkeit, Bewölkung und Potentialgefälle dagegen nicht sicher festzustellen ist. Sehr stark sind die unregelmäßigen Schwankungen. Sieht man von einigen vereinzelt bei Föhnwetter in Freiburg (Schweiz) erhaltenen Zahlen ab, so verhält sich dort wie in Wolfenbüttel der maximale zum minimalen Wert wie 17:1. Starker Wind drückt in der Regel im allgemeinen die Aktivierungszahlen herunter. Während Elster und Geitel, Saake und Simpson fanden, daß A steigt bei steigendem Barometer, habe ich im allgemeinen das Gegenteil beobachtet. Fallwinde, mag es nun der eigentliche Föhn oder die von Billwiller als Föhn aus der Anticyklone bezeichnete Luftströmung sein, vergrößern in Freiburg stets die Aktivierungszahl, während auf der Zugspitze dies nur der Föhnwind im engeren Sinne tut. Es scheint mir die erstere Erscheinung durch den Umstand bedingt zu sein, daß solche Winde die Ansammlung der radioaktiven Emanation in der Nähe des Erdbodens begünstigen. Gegen die von verschiedenen Seiten ausgesprochene Ansicht, daß sich die Luft bei dem Hinwegstreichen über die Gebirgskämme mit radioaktiven Emanationen anreichere, eine Ansicht, für welche die Beobachtungen auf der Zugspitze sprechen, muß eingewendet werden, daß in Freiburg (Schweiz) die höchsten Werte von A beobachtet wurden, wenn der Wind nicht vom Gebirge herwehte, und daß andererseits auf dem Briener Rothorn (2300 m) in der Nähe von Schutthalden im allgemeinen keine besonders hohen Werte von A gemessen wurden.

Nebel begünstigt, offenbar wegen der damit verbundenen Windstille, die Ansammlung radioaktiver Emanationen in der Nähe des Erdbodens.

Einen Einfluß der Windrichtung haben Elster und Geitel in Wolfenbüttel insofern gefunden, als bei Winden, die vom Kontinent herwehten, die Werte von A wesentlich höher gefunden wurden als bei solchen, die von der See herkamen. Dieselbe Erscheinung beobachtete Simpson in Hammerfest. Fast sämtliche Beobachter konstatieren eine Erhöhung des Wertes von A an klaren Frosttagen. Dieselben hohen Werte erhielt ich aber auch an heißen Sommertagen, und ich vermute daher, daß nicht die Temperatur, sondern die anticyklonale Wetterlage als solche den Wert von A beeinflusst. In gutem Einklang mit dieser Annahme steht die allseitig gemachte Beobachtung, daß Abwesenheit von Bewölkung den Wert von A erhöht, daß aber andererseits die

dünne Stratusschicht, welche hier in Freiburg im Winter bei hohem Luftdruck den Himmel bedeckt, den Wert von A nicht erniedrigt.

Den weitaus größten Einfluß auf den Wert von A übt die Örtlichkeit aus. Innerhalb Deutschlands und der angrenzenden Länder sind von allen Beobachtern die höchsten Werte in den Alpen, und zwar nicht bloß auf Spitzen, sondern auch in Tälern gefunden worden, die niedersten dagegen an und auf der See¹⁾. Die nachstehenden Zahlen können nur einen ungefähren Anhaltspunkt für die Beurteilung des Einflusses der Örtlichkeit geben; sie sind schon deswegen untereinander nicht genau vergleichbar, weil sie zum Teil Mittelwerte aus Beobachtungen darstellen, welche sich über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr (Freiburg, Karasjok, Wolfenbüttel), zum Teil aber auch von solchen, welche sich nur über wenige Tage erstrecken.

Insel Juist, Kiel, Zinnowitz a. d. Ostsee	7
Swinemünde	36
Wolfenbüttel	19
Halle a. S.	14
Freiburg (Schweiz)	84
Arosa (Engadin)	91
Kochel (Bayrische Kalkalpen)	137
Hammerfest	58
Karasjok	93
Palma (Mallorka)	38
Großer Ozean	0,9—4,5.

Unaufgeklärt ist die Ursache der mit Rücksicht auf die maritime Lage der Orte hohen Werte von A in Palma und Swinemünde.

Die vorliegenden spärlichen Messungen der Radioaktivität der Atmosphäre über dem Meere²⁾, sowie die Messungen an der Küste

1) Außer den bereits angeführten Arbeiten vergleiche noch: Elster und Geitel, Phys. Zt. **5**, 11, 1904; dieselben, Terr. Magn. **11**, 1, 1904; H. Brandes, Über die radioaktive Emanation der Bodenluft und der Atmosphäre, Kieler Dissertation 1905; Gockel, Met. Zt. **21**, 37, 1904; Lüdeling, Luftelektrische Messungen auf der Ostmole bei Swinemünde, Veröffentlichungen des Kgl. Preuß. Met. Inst. 1905; R. Schenk, Jahrb. für Radioakt. **2**, 19, 1905; Linke, Göttinger Nachr. 1906, 490.

2) Linke, Götting. Nachr. 1906, 490; Runge, ebenda 1907, 211; D. Pacini, Nuov. Cim. (5), **15**, Januarheft, 1908.

der Nordseeinsel Juist, und von Zinnowitz an der Ostsee¹⁾, ferner von Simpson²⁾ in Hammerfest lassen den Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen über dem Meer durchweg geringer erscheinen als über dem Festlande. Dagegen hat Lüdeling³⁾ auf einer Mole bei Swinemünde an der Ostsee Aktivierungszahlen erhalten, die höher sind als die in Wolfenbüttel gefundenen. Die nach der üblichen Methode bestimmten Aktivierungszahlen können aber nicht als ein Maß des Gehaltes der Luft an radioaktiven Induktionen angesehen werden, da sich offenbar die entladenen oder mit Wasser beschwerten Induktionen den Meßapparaten mehr oder minder entziehen. Mac Lennan⁴⁾ erhielt infolgedessen am Niagara-fall eine erheblich geringere Aktivierungszahl als in Toronto. Die Frage nach dem Emanationsgehalt der Seeluft muß daher noch als eine offene betrachtet werden. Die Ionisierung der Atmosphäre scheint über dem Meer wenig geringer zu sein als über dem Festlande (s. S. 35).

Auf Bergspitzen genügt das dort sehr starke elektrische Feld der Erde zur Aktivierung aller der Atmosphäre exponierten Gegenstände.

Brandes ließ in Kiel die zu aktivierenden Drähte durch Drachen bis zu Höhen von 350 m emporheben. Leider wurden keine gleichzeitigen Beobachtungen an der Erdoberfläche gemacht, aus dem Vergleich mit den an anderen Tagen erhaltenen Werten läßt sich aber schließen, daß der Emanationsgehalt mit der Höhe zunimmt. Die verwickelten Verhältnisse, die in einer Seestadt wie Kiel bestehen, lassen aber eine Verallgemeinerung dieses Schlusses auf andere Orte nicht zu. Von Interesse wäre zu untersuchen, inwieweit etwa die größere Staubreinheit der höheren Luftschichten das Resultat beeinflußt. Da, wie wir sehen werden, die Beweglichkeit der radioaktiven Induktionen sehr verschiedene Werte annehmen kann, so ist ein Einfluß des Staubgehaltes auf den Wert von A sehr wahrscheinlich. Der Umstand, daß in Freiburg die höchsten Werte von A bei klarer Föhnluft erhalten wurden, ließe sich ebenfalls durch die große Reinheit der Höhenluft erklären.

1) Elster u. Geitel, Phys. Zt. 4, 522, 1903.

2) G. C. Simpson, Phys. Zt. 6, 270, 1905.

3) G. Lüdeling, Veröffentlichungen des kgl. preuß. Meteor. Inst. 1905 (Sonderabdruck aus den Ergebnissen der Meteorol. Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1902).

4) J. C. Mc. Lennan, Phys. Zt. 4, 295, 1903.

J. Jaufmann fand auf der Zugspitze (2964) stets niedrigere Werte der Aktivität, wenn am Nordfuß der Alpen aufsteigende Luftströme zu Kondensation von Wasserdampf Veranlassung gaben. Lösten sich aber die Nebel wieder, so stieg die Aktivität wieder an. Besonders intensiv war dieses Ansteigen, wenn tagelang, wie es des öfteren vorkam, ein zusammenhängendes Nebelmeer (unter anderen Voraussetzungen auch Dunstmeer) das ganze umliegende Gebiet bis zu einer Höhe von etwa 1500 bis 2500 m förmlich begraben gehalten hatte. Ich sehe in dieser Erscheinung ein Analogon zu der vielfach beobachteten Tatsache, daß sich über solchen stagnierenden Nebelschichten auch negative Ionen anhäufen.

Bezüglich der täglichen Periode der Größe A gehen die Resultate der einzelnen Beobachter weit auseinander. Saake fand in Arosa eine langsame Zunahme von A vom Morgen bis 2 p und darauf wieder eine Abnahme. Simpson beobachtete ein Maximum zwischen 3 und 5 a und ein zweites schwächeres zwischen 8 und 11 p, während des Tages blieb A ziemlich konstant. Im Gegensatz hierzu beobachtete ich in Freiburg ein über den ganzen Tag sich erstreckendes Maximum und Minima in den Morgen- und Abendstunden. Es erscheint mir bemerkenswert, daß gerade in den Stunden, in denen infolge von Bildung von Dunstschichten in der Nähe des Erdbodens die Beweglichkeit der negativen Ionen stark verringert wird, auch der Wert von A abnimmt. Auf der Zugspitze nahm die Radioaktivität ebenfalls ab mit zunehmender relativer Feuchtigkeit und stieg mit zunehmender Temperatur. Die tägliche Periode fand Jaufmann ähnlich wie ich in Freiburg. Er beobachtete nämlich im Laufe des Tages eine Zunahme, nachts bis zum Morgen eine Abnahme der Aktivität. Jaufmann sieht die Ursache der Erscheinung in dem Wechsel von Berg- und Talwinden. Mit wachsender Windgeschwindigkeit stieg im allgemeinen im Gegensatz zu dem, was von andern Beobachtern in der Ebene gefunden wurde, die Aktivität.

Vom Einfluß des Windes, der je nach seiner Stärke bald mehr, bald weniger große Mengen Emanation mit dem exponierten Draht in Berührung bringen muß, und zum Teil auch von der Beweglichkeit der radioaktiven Produkte, machte sich Dike¹⁾ nach einem im Prinzip von Gerdien²⁾ angegebenen Verfahren in folgender Weise unabhängig:

1) P. H. Dike, Terr. Magn. **11**, 125, 1906.

2) H. Gerdien, Phys. Zt. **6**, 465, 1905.

Vermittels eines durch einen Wassermotor getriebenen Gebläses konnten ungefähr 150 cbm Luft per Stunde in konstantem Strom durch Metallgaze von ca. 100 qcm Querschnitt hindurchgetrieben werden, die durch eine Wimshurstmaschine auf ein negatives Potential geladen war. Wie der Versuch zeigte, war zwischen 2000 und 6000 Volt das Resultat von dem angewandten Potential ziemlich unabhängig, so daß keine besondere Sorgfalt auf die Konstanthaltung desselben gelegt zu werden brauchte. Der Betrag an radioaktiver Induktion, der sich auf dem Drahtgeflecht nach einstündiger Exposition niedergeschlagen hatte, wurde in der üblichen Weise dadurch bestimmt, daß in einem verschlossenen Gefäß das mittels einer konstanten Batterie auf 160 Volt geladene Drahtnetz zwei Messingplatten in einer Entfernung von 5,2 cm gegenüber gestellt wurde. Die letzteren waren durch einen isolierten Draht, der die Wände der Ionisierungskammer durchsetzte, mit einem sehr empfindlichen Goldblattelektrometer verbunden. Gemessen wurde also der Strom, der zwischen den Platten und dem Drahtnetz durch die Luft übergang und damit die Ionisierung der letzteren. Die Versuche, die sich allerdings nur über drei Wochen erstreckten, lassen ein Minimum des Gehaltes an radioaktiven Induktionen erkennen 6 p und ein Maximum 1 a, ein zweites Maximum tritt 4 a ein, von dieser Stunde an fällt die Kurve zuerst rasch, später langsam ab

Bezüglich der Abhängigkeit der Aktivierung von meteorologischen Faktoren haben die Versuche Dikes das Resultat der früheren Beobachter bestätigt. Die Aktivierung des Drahtnetzes war stark bei klarem windstillem Wetter, nieder bei bewölktem und unruhigem. Winde aus dem südlichen und westlichen Quadranten bewirkten eine höhere Aktivierung als solche aus dem nördlichen und östlichen. Sehr gering war der Betrag an radioaktiven Induktionen nach einem Regen. Hohe Werte der Aktivierung ergaben sich dagegen bei Nebel, obgleich das Potential des Drahtnetzes während eines solchen nur auf 1500 Volt gehalten werden konnte. Auffallend ist, daß während des Auflösens des Nebels niedere Werte der Aktivierung beobachtet wurden, während nach dem vollständigen Verschwinden desselben sich wieder hohe Werte einstellten.

Die Beweglichkeit der in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Induktionen bestimmte Gerdien¹⁾ nach folgendem Ver-

1) Phys. Zt. 6, 465, 1905 u. Abhandlungen der K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. Neue Folge. 5, Nr. 5, 1907.

fahren: Vermittels eines elektrisch angetriebenen Ventilators wurde ein Luftstrom von veränderlicher, aber meßbarer Intensität mit einer Geschwindigkeit von 75 bis 1300 cm/sek. durch einen Zylinderkondensator gesaugt, dessen äußere Elektrode ein 600 cm langes und 60 cm weites Zinkblechrohr bildete. Die innere Elektrode bestand aus einem Messingrohr von 275 cm Länge und 2,2 cm Durchmesser, das mit schraubenförmig aufgewickelten Papierstreifen von 25 cm Länge und 6,5 cm Breite überzogen wurde. Eine Akkumulatoren-batterie oder eine Influenzmaschine hielt die innere Elektrode auf einem konstanten Potential. Mittels eines eigens zu diesem Zweck konstruierten Elektrometers konnte der Sättigungsstrom gemessen werden, den der während der Aspiration auf den einzelnen Papierstreifen erhaltene aktive Belag in einem abgeschlossenen Luftquantum hervorbrachte. Je nach der Größe ihrer Beweglichkeit mußten sich die radioaktiven Induktionen mehr oder minder nahe der Mündung des Kondensators ablageren. Indem Gerdien also die Aktivität der einzelnen Papierstreifen maß, konnte er den von den Induktionen in dem Felde des Kondensators zurückgelegten Weg und damit ihre Beweglichkeit bestimmen. So ergab sich, daß die Geschwindigkeit der positiv geladenen Träger der Induktionen in einem Feld von 1 Volt/cm innerhalb sehr weiter Grenzen, nämlich zwischen 0,00007 und 2,5 cm/sek. schwankt.

Nicht ausgeschlossen ist das Vorkommen von Induktionsträgern, deren Beweglichkeit außerhalb der hier angegebenen Grenzen liegt; doch treten schon die angegebenen Grenzwerte nur vereinzelt auf, und die große Mehrzahl der abgefangenen Induktionen besitzt Beweglichkeiten, die zwischen 0,5 und 1,75 cm/sek. Volt/cm liegen. Bei den Thoriuminduktionen scheinen die Zahlen der Träger mit 1,75 übersteigenden Geschwindigkeiten etwas seltener zu sein als bei Radiuminduktionen. Die Zahl der negativ geladenen Induktionsträger, die sich auf positiv geladenen Drähten niederschlagen, ist, wie dies schon aus den oben erwähnten Versuchen hervorgeht, bedeutend — bei den Gerdien'schen Versuchen etwa 100 mal — geringer als die der positiv geladenen. Die Beweglichkeiten der beiden Induktionsarten sind dagegen von derselben Größenordnung, doch entfallen bei den negativ geladenen Trägern verhältnismäßig geringere Zahlen auf die großen spezifischen Geschwindigkeiten als bei den positiv geladenen. Die Vermutung liegt nahe, daß auch ungeladene Träger radioaktiver In-

duktionen existieren. Versuche Gerdiens, solche vermittels eines Wattefilters abzufangen, führten zu keinem Resultate.

Auch Laboratoriumsversuche haben gezeigt, daß sich die aktiven Niederschläge des Radiums und Thoriums mit der mittleren Geschwindigkeit der Gasionen bewegen. Auffallenderweise fand dagegen Eve¹⁾, daß der Aktionsradius eines auf -1000 Volt geladenen Drahtes noch nicht ganz ein Meter beträgt, während Gasionen schon aus viel größerer Entfernung herbeigezogen werden müßten.

Entsprechend dem Umstande, daß stets mit sehr verschiedenen Beweglichkeiten begabte Induktionsträger gleichzeitig vorhanden sind, ist die mittlere Beweglichkeit derselben bedeutenden Schwankungen unterworfen. Dadurch erklärt sich wohl auch die Beobachtung, daß die nach der Elster- und Geitelschen Methode vorgenommenen Bestimmungen der Aktivierungskonstante A eine andere tägliche Periode ergeben als die im folgenden zu besprechenden Messungen. Die von Gerdien gefundenen großen Unterschiede in der Beweglichkeit der radioaktiven Induktionen erklären sich nach dem genannten Autor durch den Umstand, daß diese Induktionen sich sofort nach ihrem Entstehen an Molekülkomplexe der verschiedensten Art, auch Staubkerne und Wassertropfchen, anlagern.

Die Gerdienschen Versuche zeigen, daß die Bestimmung des Gehaltes der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen in derselben Weise vorgenommen werden kann, wie die des Ionengehaltes. Die ersten Versuche dieser Art wurden von Mache und Rimmer²⁾ und auf Veranlassung Maches von dessen Schüler F. Kohlrausch³⁾ vorgenommen. Die Genannten bedienen sich für ihre Messungen eines Ebertschen Aspirators größter Dimension. Die Länge der Röhre betrug 1 m, die Weite 16 cm. Ein elektrisch betriebener Ventilator saugte die Luft mit einer Geschwindigkeit von 2 m per Sekunde durch die Röhre hindurch. Der mit dem Elektroskop verbundene, in der Mitte des Rohres sitzende Stab wurde auf 200 Volt geladen. Die Röhre wurde zunächst durch Kappen von der Außenluft abgesperrt und der Sättigungsstrom zwischen Stab und Rohrwand gemessen, dann wurde eine halbe Stunde lang

1) Eve, Phil. Mag. **10**, 98, 1905.

2) H. Mache u. T. Rimmer, Phys. Zt. **7**, 617, 1906.

3) F. Kohlrausch, Wien. Ber. **115**, 2a, 1263, 1906.

aspiriert, der dann nach Abschluß der Röhre erhaltene Sättigungsstrom konnte nach Abzug des vor der Aspiration erhaltenen, als ein Maß der Aktivierung des Stabes betrachtet werden.

Aus den nicht sehr zahlreichen Messungen von Kohlrausch ergibt sich, daß übereinstimmend mit dem, was frühere Beobachter gefunden, die Aktivierung der Atmosphäre ein Minimum gegen Mittag aufweist, und daß großer Feuchtigkeit einerseits, klarem Himmel andererseits hohe Induktionswerte entsprechen. Zum Barometerstande wurde keine Beziehung gefunden, wohl aber zur Barometerbewegung. Bei fallendem Luftdruck wurden die höchsten, bei steigendem die niedersten Aktivierungszahlen erhalten. Die Ionisierung der Atmosphäre nahm im allgemeinen, wie dieses auch von den früheren Beobachtern konstatiert wurde, mit dem Induktionsgehalt zu.

Im allgemeinen findet man, daß alle meteorologischen Faktoren, welche ein hohes Potentialgefälle begünstigen, auch den Gehalt der Atmosphäre an Induktionsträgern steigern. Ausnahmen sind freilich, besonders in bezug auf die tägliche Periode der beiden Größen an manchen Orten vorhanden. In zweiter Linie scheint die Aktivierung von der Richtung der vertikalen Luftbewegung abzuhängen.

Der Sättigungsstrom ε , welchen die in einem Kubikmeter Luft enthaltenen Induktionsträger hervorrufen, wurde von Kohlrausch im Mittel zu $0,5 \times 10^{-5}$ E. S. E. bestimmt.

Der Genannte hat aber bei seiner Berechnung den Umstand nicht in Betracht gezogen, daß nach dem Auftreffen der radioaktiven Substanzen auf dem Zerstreungskörper nur noch die Hälfte der ausgehenden Strahlen ionisierend wirksam wird. Die andere Hälfte dringt nach innen in den Zerstreungskörper ein. Ferner zeigt Kurz¹⁾ auf Grund eigener und von W. Schmidt ausgeführter Versuche, daß die Kohlrauschsche Annahme, es werde in der Hauptsache nur Radium C auf der Elektrode des Kondensators niedergeschlagen, nicht richtig ist. Mittels der von ihm an der Kohlrauschschen Berechnungsweise vorgenommenen Korrekturen findet er daher auf Grund der Kohlrauschschen Zahlen ε zu $4,2 \times 10^{-5}$ E. S. S. Eigene, ebenfalls nach der Aspirationsmethode ausgeführte Versuche in Gießen ergaben Kurz ε im Mittel von

1) K. Kurz, Phys. Zt. 9, 177, 1908.

10 Versuchen = $7,16 \times 10^{-5}$ E. S. E., also in guter Übereinstimmung mit dem aus den Zahlen von Kohlrausch berechneten. Verfasser hat in Freiburg (Schweiz) durchweg kleinere Werte für ϵ erhalten.

Der Anteil, den die radioaktiven Induktionen an der gesamten Ionisation der Atmosphäre haben, ist, wie wir gleich sehen werden, gering. Ihre Zahl ist schon deshalb, weil sie von den Niederschlägen zur Erde geschafft werden, und weil sie infolge ihrer Ladung den Kraftlinien des Erdfeldes folgen müssen, sehr veränderlich. Wichtiger als die Bestimmung des Gehaltes der Atmosphäre an diesen Produkten erscheint deswegen die Bestimmung des Gehaltes an radioaktiver Emanation. Hierfür sind verschiedene Wege eingeschlagen worden.

Eve¹⁾ exponierte in einem mit Luft gefüllten eisernen Behälter von 7 cbm Inhalt einen auf -100000 Volt geladenen Draht. Die ionisierende Wirkung der auf dem Draht induzierten Aktivität wurde verglichen mit der, welche eine bestimmte, in das Gefäß eingeführte Menge Radiumemanation unter sonst gleichen Umständen lieferte. Unter der Annahme, daß die Luft im Behälter sich in bezug auf ihren Emanationsgehalt ebenso wie die in der freien Atmosphäre verhielt, wurde gefunden, daß ein Kubikkilometer Luft ebensoviel Emanation enthielt, als 0,56 g Radiumbromid liefern konnten. Als aber Eve den Eisenbehälter durch einen offenen Zinkzylinder ersetzte, war der Betrag der erregten Aktivität pro Volumeneinheit Luft nur ein Drittel des in dem Eisenbecken gefundenen. Der erste Wert ist 20 mal größer als der von Kohlrausch gefundene.

Einen anderen direkten Weg zur Bestimmung des Emanationsgehaltes der Atmosphäre hat auf Veranlassung Maches Hofmann²⁾ betreten. Er verwendete die Eigentümlichkeit des Petroleums bei -21° etwa 2,5 mal mehr Emanation zu absorbieren als bei Zimmertemperatur, um die Emanationsmenge, welche das Petroleum aus einem bestimmten Luftquantum aufnahm und damit aus dem für die betreffende Temperatur bekannten Absorptionskoeffizienten des Petroleums die in dem durchgeleiteten Luftquantum selbst enthaltene Emanationsmenge zu bestimmen. Der Sättigungsstrom, der von der in einem Kubik-

1) Eve, Phil. Mag. **10**, 98, 1905.

2) R. Hofmann, Phys. Zt. **6**, 337, 1905.

meter atmosphärischer Luft enthaltenen Emanationsmenge hervorgerufen wurde, bestimmte sich zu $1,4 \times 10^{-3}$ E. S. E., war also fast 300 mal größer als der von Kohlrausch gefundene Wert. Laboratoriumsluft erwies sich als etwa $2\frac{1}{2}$ mal, Kellerluft 8 mal reicher an Emanation. Die von Hofmann angewandte Methode zur Bestimmung des Emanationsgehaltes der Luft dürfte, wie er selbst bemerkt, genauere Resultate liefern, wenn die Absorption der Emanation durch einen Kohlenwasserstoff, z. B. Toluol, bei Temperaturen von mindestens -70° erfolgt.

Eve¹⁾ verwendete nach einem Vorschlag Rutherfords als absorbierendes Mittel Kokosnußholzkohle. Indem er die aus der Atmosphäre absorbierte Emanationsmenge verglich mit der unter gleichen Umständen aus einer Radiumsalzlösung von bekannter Konzentration absorbierten Menge, fand er, daß die im Kubikmeter enthaltene Emanationsmenge im Mittel gleich der von $0,123 \times 10^{-9}$ g Radiumbromid abgegebenen Menge ist. Die Zahl ist kleiner als die oben angegebene. Die Einzelwerte schwanken natürlich je nach den meteorologischen Verhältnissen, sind aber alle von derselben Größenordnung.

Eingehendere Versuche über die Natur der in der Atmosphäre induzierten Radioaktivität wurden zuerst von Rutherford und Allan²⁾ angestellt. Sie bestimmten die Abklingungskonstante aktivierter Drähte, indem sie dieselben nach der Exposition zur inneren mit einem Dolezalekschen Elektrometer verbundenen Elektrode eines Luftkondensators machten, dessen äußere Elektrode auf einem konstanten Potential gehalten wurde. Die Intensität des Sättigungsstromes, die der Aktivierung des Drahtes proportional sein mußte, nahm in geometrischem Verhältnis mit der Zeit ab, und zwar verringerte sie sich in ungefähr 45 Minuten um die Hälfte.

Der größte Teil der von dem aktivierten Draht ausgehenden Strahlung zeigt ein sehr geringes Durchdringungsvermögen. Aluminiumfolie von 0,01 mm Dicke schwächt die ionisierende Wirkung der Strahlung bereits um 50 Proz. Eine wenn auch schwache photographische Wirkung läßt sich noch durch ziemlich dicke Aluminiumbleche hindurch erzielen, es muß also ein Teil der Strahlung aus β - oder γ -Strahlen bestehen. Die α -Strahlen werden,

1) Phil. Mag. 14, 724, 1907.

2) Phil. Mag. 4, 704, 1902; Phys. Zt. 3, 225, 1902.

wie Bragg und Kleeman¹⁾ zeigten, bei Atmosphärendruck durch eine Luftschicht von 6—7 cm Dicke vollständig absorbiert.

Wie die unten zu besprechenden Versuche über Ionisierung in geschlossenen Gefäßen erkennen lassen, geht von den in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Produkten eine sehr durchdringende Strahlung aus. Nach Versuchen von Eve²⁾ ist die ionisierende Wirkung derselben 16 mal kleiner als die der α -Strahlung. Die erstere erzeugt in der Sekunde 2—7 Ionen im Kubikzentimeter.

Der Intensität der γ -Strahlung würde ein Gehalt von einigen Dezigrammen Radium im Kubikkilometer Atmosphäre entsprechen. Eine weitere durchdringende Strahlung scheint, wie wir sehen werden, von der Erdoberfläche selbst auszugehen und läßt sich erklären durch den beobachteten Gehalt der Erdkruste an radioaktiven Substanzen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Rutherford und Allan über die Geschwindigkeit, mit welcher die auf einem der Atmosphäre exponierten negativ geladenen Draht induzierte Radioaktivität abklingt, wurden durch weitere Versuche Allans³⁾ im großen und ganzen bestätigt, doch wiesen die von ihm erhaltenen Abklingungskurven zeitweise Unregelmäßigkeiten auf.

Die von Elster und Geitel⁴⁾ erhaltenen Abklingungskurven schließen sich genügend genau der von Frau Curie für das Abklingen der Radiuminduktion berechneten Formel an, weichen demgemäß bedeutend von den von Rutherford und Allan beobachteten Abklingungskurven, die einfache Exponentialkurven mit einer Halbwertskonstante (Zeit innerhalb welcher die Radioaktivität auf die Hälfte ihres Wertes herabsinkt) von 45 Minuten sind, ab. Die Radiuminduktion klingt anfänglich nicht nach einem einfachen Exponentialgesetz ab, und wenn sie anfängt dieses Verhalten zu zeigen, ist die Halbwertskonstante 28 und nicht 45 Minuten.

Bumstead⁵⁾, der die Widersprüche aufzuklären versuchte, fand, daß anfänglich zwar die Abklingung der auf dem exponierten Draht induzierten Aktivität nach dem für Radiuminduktion gültigen

1) Phil. Mag. 8, 726, 1904.

2) Phil. Mag. 12, 189, 1906.

3) Phil. Mag. 7, 140, 1904.

4) Phys. Zt. 5, 11, 1904.

5) Phys. Zt. 5, 540, 1904.

Gesetz vor sich ging, daß aber gegen Ende die Abfallsgeschwindigkeit sich verlangsamte.

Die Halbwertskonstante war schließlich $10\frac{1}{2}$ Stunde, das ist nahezu der Wert der Halbwertskonstante der Thoriuminduktion. Indem Bumstead die Dauer der Exposition des Drahtes in der Atmosphäre auf 12 Stunden verlängerte, gelang es ihm, größere Mengen der langsam abklingenden Induktion auf diesem anzusammeln. Das Vorhandensein von Zerfallsprodukten des Thoriums auf dem Draht war so nachgewiesen, indessen zeigte es sich, daß zwischen 1 und 2 Stunden die Aktivität des Drahtes etwas schneller abnahm, als einer Kombination von Radium und Thorium entspricht. Die Ursache dieser Unregelmäßigkeit konnte Bumstead nicht aufklären, auf die Anwesenheit von Aktinium ist dieselbe, wie die Form der Kurve zeigt, nicht zurückzuführen. Bestätigt wurden die Bumsteadschen Resultate durch Versuche, die Burbank¹⁾ in Göttingen anstellte.

Auch Gockel²⁾ fand in Freiburg (Schweiz) und auf dem Briener Rothorn, daß sich auf dem 12 Stunden lang exponierten Draht erhebliche Mengen (20—60 Proz. der gesamten Induktion) von Thoriuminduktionen ablagern. Am geringsten scheint nach dieser Messung der Gehalt der Atmosphäre an Thoriuminduktion nach längerem Regen zu sein. Dieser Umstand läßt in Verbindung mit der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation darauf schließen, daß weniger Emanation als vielmehr Thorium A und B in der Atmosphäre vorhanden ist.

Für quantitative Bestimmungen ist indessen zu berücksichtigen, daß die Intensität der Aktivität, welche ein exponierter Körper zeigt, mit der Dauer der Exposition wächst bis zu einem Höchstwert, welcher erreicht ist, wenn die Induktionsmenge, welche in einer bestimmten kurzen Zeit zerfällt, ebenso groß ist, als diejenige, welche in derselben Zeit sich absetzt. Dieser Endwert wird bei Radium praktisch nach 3—4 Stunden, bei Thorium aber erst nach 73 Stunden erreicht. Blanc³⁾ hat in Rom deshalb die Expositionszeit auf 3 Tage ausgedehnt. Zur Ladung des Drahtes auf —500 Volt benutzte er eine Batterie von kleinen Akkumulatoren. Er fand, daß die Aktivität des Drahtes nach Unter-

1) Phys. Zt. 6, 437, 1905.

2) A. Gockel, Phys. Zt. 8, 701, 1907.

3) Phil. Mag. 13, 380, 1907; N. Cim. 14, 199, 1907; Phys. Zt. 9, 294, 1908.

brechung der Exposition zuerst rasch, dann aber langsam abnahm, so daß die Abklingungskurve gleich der des Thoriums wurde. Der Betrag an Induktion vom Typus des Radiothorium wurde zu 50—70 Proz. der gesamten induzierten Aktivität gefunden. Versuche in den Katakomben lieferten dieselben Resultate wie die im Freien. Betrug die Expositionsdauer nur 3—5 Stunden, so schwankte die Zeit, innerhalb welcher die Aktivität des Drahtes auf die Hälfte ihres Wertes sank, zwischen 50 und 60 Minuten, die Abklingungskonstante war also identisch mit dem von Rutherford und Allan in Montreal gefundenen Werte.

Blanc, Gockel und Jaufmann fanden, daß der Gehalt an induzierter Aktivität vom Thoriumtypus weit konstanter ist als an der vom Radiumtypus. Blanc suchte die Erklärung für diese Beobachtung in folgendem Umstand. Bei der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation kommt für den Gehalt der Atmosphäre an Induktionen nur die aus den obersten Erdschichten entweichende Emanation in Betracht (die im Boden entstehenden Induktionen werden in diesem auch wieder absorbiert). Diese Menge hängt aber nicht wie die Menge der aus den tieferen Erdschichten entweichenden Radiumemanation von dem Gang des Barometers, und ich möchte hinzufügen von der mit dem Wassergehalt schwankenden Durchlässigkeit des Bodens ab.

Dadourian¹⁾ fand in New Haven, daß nach 4 tägiger Exposition 30—40 Proz. der angesammelten Induktionen, also weniger als Blanc erhalten hatte, dem Thorium entstammte. Noch geringere Beträge des Gehaltes an Thoriuminduktion (unter 10 Proz. der Gesamtaktivität) fanden Gockel und Wulf am Matterhorn.

Bei Berechnung der Ionisierungsarbeit, welche von den einzelnen radioaktiven Produkten geleistet wird, ist zu berücksichtigen, daß dieselbe nicht proportional den auf dem exponierten Draht gewonnenen Mengen ist; denn die am Ende der Exposition vorhandenen Mengen von Radium A, B und C stammen von den Luftmengen ab, welche in den letzten 2—3 Stunden der Exposition am Drahte vorbeistrichen, die Thoriuminduktion dagegen von der ganzen Menge, welche während der Dauer der Exposition in die Nachbarschaft des Drahtes kam. Einer rechnerischen Behandlung des Problems, aus dem Verhältnis der am Schluß der Exposition des Drahtes vorhandenen Menge von Induktionen jeder Gattung

1) H. Dadourian, *Le Radium* 5, 102, 1908 u. *Phys. Zt.* 9, 333, 1908.

das Verhältnis der während der Dauer der Exposition im Mittel in der Atmosphäre vorhanden gewesenen zu bestimmen, steht nicht nur die Veränderlichkeit der Stärke der Luftströmung, sondern vor allem auch der Umstand entgegen, daß der Anteil der Induktionen, welcher aus einem am Draht vorbei passierenden Luftquantum sich auf dem Draht niederschlägt, von der Geschwindigkeit der Luftströmung und von der Beweglichkeit der Induktionen abhängt. Auch diese Beweglichkeit schwankt stark mit dem Staub- und Wasserdampfgehalt der Luft.

Blanc hat deshalb eine Methode angewendet, die ihm erlaubt, in einem gegebenen Moment sämtliche zur Zeit in einem gewissen Luftraum vorhandenen radioaktiven Induktionen niederzuschlagen. Es ist dieses die von Sella zuerst angewandte Methode der elektrischen Ausströmung. Stellt man einer mit dem Pole einer Influenzmaschine verbundenen Spitze eine mit dem andern Pol verbundene Platte gegenüber, so schlägt sich, sobald die Ausströmungen aus der Spitze beginnen, auf der Platte das gesamte in dem von Elektrizität durchströmten Luftraume vorhandene feste radioaktive Material nieder. Mittels dieser Methode konnte Blanc feststellen, daß 4—7 Proz. der von den festen, in der Atmosphäre suspendierten radioaktiven Produkten geleisteten Ionisierungsarbeit, von Thorium B und C herrühren. Zu fast demselben Resultat kam Gerdien mittels der (S. 182) beschriebenen Methode.

Aus den von Gockel (l. c.) erhaltenen Abklingungskurven läßt sich der Schluß ziehen, daß nicht nur Zerfallsprodukte des Thoriums, sondern auch solche des Aktiniums in der Atmosphäre enthalten sind. Zu demselben Resultate kam auch Jaufmann¹⁾, der auf der Zugspitze (2964 m) nach dem Elster- und Geitelschen Verfahren, aber unter Benutzung des an dieser Stelle natürlich sehr starken Erdfeldes statt der künstlichen negativen Ladung des Drahtes arbeitete. Daß in dieser Höhe die Atmosphäre noch Aktiniumemanation oder Zerfallsprodukte dieses Stoffes enthält, ist im Hinblick auf die kurze mittlere Lebensdauer dieser Produkte (Halbwertskonstante für Aktiniumemanation 3,9 Sek., Aktinium A 35,7 Minuten und Aktinium B 2,15 Minuten) sehr merkwürdig.

In der raucherfüllten Luft von Cincinnati erhielt Allan²⁾ ziemlich unregelmäßige Abklingungskurven, die aber erkennen

1) J. Jaufmann, l. c.

2) S. J. Allan, Phys. Rev. 26, 206, 1908.

lassen, daß dort, und zwar in zeitlich stark schwankenden Mengen vorhanden sind Radium, ferner ein Stoff, der mit einer Halbwerts-konstante von 38 Minuten abklingt, also wohl Aktinium, und Thoriuminduktionen. Auf positiv geladenen Drähten wurde nur ein geringer Bruchteil des auf negativ geladenen sich absetzenden aktiven Niederschlags erhalten. Auf ungeladenen Drähten sammelten sich dagegen ungefähr 25 Proz. des im Maximum auf negativ geladenen erhaltenen an.

Runge¹⁾ fand bei Beobachtungen im englischen Kanal und in der Bucht von Biscaya und Pacini²⁾ im Golf von Ligurien, daß sich auf dem negativ geladenen Draht außer Radiuminduktion noch eine andere Substanz absetzte, deren Abklingungskurve logarithmisch aufgetragen, zwischen $t = 20$ und $t = 50$ Minuten etwa der Abklingungskurve der von Radium induzierten Aktivität parallel ist, vorher aber steiler und nachher flacher verläuft. Westlich der Südküste Spaniens in größerer Nähe des Landes fand Runge nur Radiuminduktionen. Thorium konnten in der Seeluft weder Runge noch Pacini nachweisen.

Bei der Beurteilung des Anteils, den die verschiedenen radioaktiven Substanzen an dem aktiven Niederschlag nehmen, darf auch nicht übersehen werden, daß ein, wenn auch in der Regel sehr geringer Teil der Induktionsträger negativ geladen ist, auf negativ geladenen Drähten also nicht niedergeschlagen werden kann. Nach Versuchen von Russ³⁾ sind von den aus Thoriumemanation entstehenden Induktionsträgern $\frac{1}{2}$ Proz., von den aus Radiumemanation entstehenden 5 Proz., und von den Aktiniuminduktionen 30 Proz. negativ geladen. Je länger der Weg ist, den die Teilchen in der Atmosphäre zurückzulegen haben, desto kleiner wird aber der Prozentsatz an negativ geladenen. Eine sich auf die S. 189 erwähnten Versuche stützende Rechnung von Dadourian⁴⁾, wonach in New Haven die Menge der in der Atmosphäre vorhandenen Radiumemanation 30 000—50 000 mal, in Rom aber 20 000 bis 30 000 mal so groß ist als die der Thoriumemanation, bedürfte hiernach einer Korrektur, die aber an der Größenordnung, und diese kann vorläufig allein in Betracht kommen, nichts ändern wird.

1) C. Runge, Göttinger Nachr. 1907, 211.

2) D. Pacini, Nuov. Cimento **15**, 24, 1908.

3) S. Russ, Phil. Mag. **15**, 601, 1908.

4) H. M. Dadourian, l. c.

6. Durchdringende Strahlung. Die ersten Versuche Elsters und Geitels über die Ionisation in geschlossenen Gefäßen, wurden in der Weise ausgeführt, daß der Zerstreungsapparat auf einer Eisenplatte unter einer mit einem Drahtnetz ausgekleideten Glasglocke von etwa 24 l Inhalt aufgestellt wurde. Der Verfasser hat die Versuche Elsters und Geitels bald nach ihrem Bekanntwerden wiederholt mit der einzigen Abänderung, daß er, um Ladungen auf der Innenwand der Glocke sicher zu verhüten, dieselbe bis auf zwei zum Ablesen bzw. Beleuchten dienende Fenster mit Stanniol ausklebte. Die Zunahme der Leitfähigkeit konnte unter diesen Umständen nicht aufgefunden werden. Bevor die Ursache der Abweichung aufgeklärt war, zeigten Rutherford und Cooke¹⁾ einerseits, Mc. Lennan und Burton²⁾ andererseits, daß die Ionisierung in einem abgeschlossenen Gefäße abhängt von der Natur der Wandung, unter Umständen mit der Zeit sogar abnehmen kann und verringert wird durch eine Umhüllung des Gefäßes mit dicken Bleischirmen. Damit war die Existenz einer, wie es schien, überall vorhandenen, durchdringenden Strahlung erwiesen.

Die ausschließliche Ursache der Ionisation kann diese durchdringende Strahlung, deren Quelle noch fraglich ist, nicht sein; denn Cooke³⁾ konnte zeigen, daß etwa 70 Proz. der Ionisation zurückblieben, auch wenn das Gefäß mit dicken Bleischirmen umgeben wird. Diese Abnahme der Ionisation in einem geschlossenen Gefäß infolge der Umhüllung desselben mit einem Bleischirm ist aber, wie Wood⁴⁾ nachgewiesen hat, bei Anwendung eines und desselben Schirmes weder ihrem absoluten Betrage nach bei allen Gefäßen gleich, noch steht sie in einem konstanten Verhältnis zur ursprünglichen Ionisation. Es folgt daraus, daß ein Teil des Einflusses der Wandung von Sekundärstrahlung, ein anderer von andern Umständen herrühren muß. Die Existenz einer durchdringungsfähigen sekundären Strahlung scheint in der Tat durch Versuche von Eve⁵⁾ und Mc. Clelland⁶⁾ nachgewiesen zu sein.

1) E. Rutherford u. H. L. Cooke, Phys. Rev. **16**, 183, 1903.

2) J. C. Mc. Lennan u. E. F. Burton, Phil. Mag. **6**, 343, 1903; Phys. Rev. **16**, 184, 1903; Phys. Zt. **4**, 553, 1903.

3) Phil. Mag. **6**, 483, 1903.

4) Phil. Mag. **9**, 550, 1905.

5) Phil. Mag. **8**, 669, 1904.

6) Phil. Mag. **9**, 230, 1905.

Daß dabei Metalle auch eine primäre Strahlung von der Durchdringungsfähigkeit der α -Strahlen aussenden, ergibt sich aus Versuchen von Campbell¹⁾.

Die Ionisierung von Gasen in einem geschlossenen Gefäße kann demnach folgenden Agentien ihre Entstehung verdanken:

1. der in dem Gase enthaltenen radioaktiven Emanation oder deren Zerfallsprodukten,

2. einer Strahlung von hohem Durchdringungsvermögen, welche ausgeht von radioaktiven Stoffen oder deren Zerfallsprodukten, welche sich außerhalb des Gefäßes auf den Mauern oder anderen Gegenständen der Umgebung befinden oder sich auf den Wänden des Gefäßes niedergeschlagen haben,

3. einer von den Gefäßwänden ausgehenden Strahlung.

Diese letztere selbst kann primär sein, sei es, daß jedes Metall mehr oder weniger radioaktiv ist, sei es, daß es radioaktive Stoffe in minimalen Mengen beigemischt enthält, oder sie kann sekundär erregt sein durch eine äußere Strahlung oder auf der Außenwand des Gefäßes niedergeschlagene Induktionen.

Für die Ionisierung der freien Atmosphäre kommen die Eigentümlichkeiten der einzelnen Metalle nicht weiter in Betracht, und ich kann von einem Eingehen auf dieselben hier um so mehr absehen, als Campbell²⁾ im Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik einen ausführlichen Bericht über die einschlägigen Arbeiten gegeben hat. Bemerkenswert sei aber nur, daß nach einer neueren Untersuchung von Wood und Campbell³⁾ die Zunahme der Ionisation abgeschlossener Luftmassen mit der Zeit sehr stark ist in Gefäßen von Blei, das auch nach anderen Versuchen radioaktiv zu sein scheint, dagegen schwach ist in solchen von Zink. In geschlossenen Gefäßen von verschiedenem Material und von den Größen von 1—120 l erwies sich nach Versuchen von Gockel⁴⁾, Mache⁵⁾, Paterson⁶⁾ die Ionisation als unabhängig von der Temperatur; die beiden erstgenannten Autoren konnten auch eine Unabhängigkeit von der

1) Phil. Mag. 9, 531, 1905 u. Jahrb. f. Rad. u. Elek. 2, 434, 1906.

2) Jahrb. f. Rad. u. Elek. 2, 434, 1905.

3) Phil. Mag. 13, 265, 1907.

4) A. Gockel, Luftelektrische Untersuchungen. Freiburg (Schweiz) 1902. S. 41.

5) Wien. Ber. 110, 2a, 1302, 1901.

6) Phil. Mag. 6, 201, 1903.

relativen Feuchtigkeit feststellen, wenigstens solange die letztere unter dem Betrag von 70 Proz. blieb. Dieses Verhalten der eingeschlossenen Luft änderte sich, wie Gockel zeigte, auch dann nicht, wenn der Abschluß des Gefäßes kein luftdichter war.

Nach C. T. Wilson¹⁾ ist bei Füllung eines und desselben Gefäßes die Ionisation abhängig von dem Absorptionsvermögen der eingeschlossenen Gase für α -Strahlen.

Die Ionisation der freien Atmosphäre kann nach dem bisher Gesagten verursacht werden 1. durch eine Strahlung von geringer Durchdringungsfähigkeit, welche ausgeht von den im Boden enthaltenen radioaktiven Stoffen. Diese Strahlung wird in erster Linie eine Ionisierung der in den Erdkapillaren enthaltenen Luft herbeiführen;

2. durch eine von den in der Luft vorhandenen Zerfallsprodukten radioaktiver Stoffe ausgehende Strahlung von geringer Durchdringungsfähigkeit;

3. durch eine, ihrer Quelle nach noch unbekannte Strahlung von sehr hoher Durchdringungsfähigkeit;

4. durch in die obersten Schichten eindringende geladene Teilchen (Arrhenius, Joly)²⁾.

Die beiden ersten Punkte sind früher besprochen worden.

Es bleiben hier also nur noch einige Worte zu sagen bezüglich der durchdringenden Strahlung. Wood und Campbell³⁾ kamen zu dem auffallenden Ergebnis, daß diese Strahlung eine ausgesprochene tägliche Periode aufweist, deren zwei Minima zwischen 2 u. 6 a und 12 u. 3 p, und deren zwei Maxima zwischen 8 u. 11 a und 9 u. 11 p liegen. Wie man sofort sieht, verläuft die Kurve ganz analog der des Potentialgefälles. Ihre Form erwies sich als unabhängig von der Natur des eingeschlossenen Gases und der Gefäßwände. Ein Minimum der durchdringenden Strahlung um 3 p hat auch Bergmann⁴⁾ in St. Petersburg beobachtet.

Zu demselben Ergebnis wie Wood und Campbell gelangten auch Mc. Keon⁵⁾ in Washington, Mache und Rimmer⁶⁾ in Wien.

1) Proc. Roy. Soc. **69**, 277, 1901.

2) J. Joly, Nature **75**, 294, 1907.

3) Phil. Mag. **13**, 265, 1907; Nature **73**, 583, 1906.

4) Siehe Richardson, Nature **73**, 607, 1906.

5) Mc. Keon, Physic. Review **25**, 399, 1907.

6) H. Mache u. T. Rimmer, Phys. Zt. **7**, 619, 1906.

Die Versuche des ersteren sind nicht einwandfrei, da er nicht direkt die Ionisation der in dem Gefäße eingeschlossenen Gase, sondern die Schwankungen der Potentialdifferenz zwischen äußerer und innerer Elektrode maß. Die letzteren verwendeten für ihre Versuche einen aus dem dünnsten käuflichen Zinkblech gefertigten Zylinder von 400 l Inhalt. Das im Innern befindliche Elektroskop trug als „Zerstreuungskörper“ ein leichtes Metallrohr. Die Stellung der Aluminiumblättchen des Elektroskops wurde mit einem Mikroskop abgelesen. Es fand sich, daß die Ionisation im Innern des Gefäßes morgens und abends um etwa 4 Proz. höher war als mittags. Mache und Rimmer erklären diese Erscheinung durch die Annahme, daß zur Zeit der Maxima des Potentialgefälles (morgens und abends) auch die Strömung der radioaktiven Induktionen (Zerfallsprodukte des Radiums) gegen die Erde ihren Höchstwert erreiche. Bezüglich der Ionisation der freien Atmosphäre bemerken die genannten Forscher: „Es braucht nicht zu befremden, daß zur gleichen Zeit die Zerstreuungsbeobachtungen Minima der allgemeinen, hauptsächlich der Wirkung der α -Strahlen zuzuschreibenden Ionisation andeuten. Für diese wird ja doch in erster Linie die Raumdichte der Emanation und ihrer Zerfallsprodukte in Frage kommen und diese kann sehr wohl zur selben Zeit ein Minimum aufweisen, in welcher der radioaktive Belag der Erdoberfläche infolge des hohen Potentialgefälles das Maximum erreicht.“

Für den Unterschied, der hier gemacht wird, zwischen der Intensität derjenigen Strahlung, welche die Ionisierung in der freien Atmosphäre und derjenigen, welche die Ionisierung im geschlossenen Gefäße bewirkt, scheint mir kein zwingender Grund vorzuliegen. Wie schon früher erwähnt (S. 29), kann man weder aus der Größe der Zerstreuung noch aus der Zahl der vom Ebertschen Aspirationsapparat eingefangenen Ionen einen Schluß auf die Stärke der ionisierenden Strahlung ziehen. Die Angaben beider Apparate hängen von dem Gleichgewicht zwischen kleinen und schweren Ionen ab, und dieses Gleichgewicht wird gerade in den Morgen- und Abendstunden infolge der Belastung der Ionen mit Wasser zu Gunsten der Molionen verschoben. Eine andere Erklärung gibt O. W. Richardson. Er nimmt mit Arrhenius die Existenz einer außerterrestrischen Quelle ionisierender Strahlen von sehr hohem Durchdringungsvermögen an. Steigt die Intensität dieser Strahlung, so muß natürlich auch die Ionisierung in einem geschlossenen Gefäß und ebenso auch die Ionisation der Atmo-

sphäre vor allem in den oberen Schichten zunehmen und damit das Potentialgefälle in der Nähe des Erdbodens steigen. Einem Maximum des letzteren entspricht also auch ein Maximum der Ionisierung in dem geschlossenen Gefäße und umgekehrt. Die Annahme einer außerhalb der Erde sich befindlichen Strahlungsquelle ist nicht unbedingt notwendig. Dieselben Dienste für die Erklärung würde, wie Richardson selbst bemerkt, auch eine Strahlungsquelle leisten, die gleichzeitig die durchdringende Strahlung in der Nähe der Erdoberfläche und die Ionisation in den oberen Schichten der Atmosphäre vermehrt. Zu der Annahme einer Strahlung, die zwar die in einem Gefäß eingeschlossenen Gase, nicht aber die der Erde benachbarten unteren Schichten der Atmosphäre ionisiert, wurde Richardson durch die auch von Mache und Rimmer bestätigten Feststellungen der Herren Campbell und Wood geführt, daß Maxima der Ionisation in einem geschlossenen Gefäße zusammenfallen mit den Minima der Ionisation in der umgebenden freien Atmosphäre. Wie ich schon bemerkte, ist der Schluß kein zwingender, da weder Campbell und Wood noch Mache und Rimmer, wie sie auch selbst hervorheben, die Gesamtionisation der Luft, d. h. den Gehalt an leicht beweglichen und an Langevinionen gemessen haben. Außerdem erscheint mir die Existenz einer Strahlung, welche zwar die Luft in den höchsten Schichten der Atmosphäre ionisiert, die dichtere in der Nähe der Erdoberfläche aber nur dann, wenn sie vorher eine Metallschicht, und sei es auch nur das dünnste im Handel zu habende Zinkblech, passiert hat, sehr unwahrscheinlich. In Betracht kommt ferner auch, daß die Amplitude der täglichen Schwankung der Ionisation in geschlossenen Gefäßen von der Natur der Wandung derselben abhängt. Wood und Campbell fanden absolut genommen die Schwankung am größten in Bleigefäßen, prozentisch war dagegen die Amplitude größer in Zinkgefäßen wegen der geringeren Ionisation in letztern.

Daß die täglichen Schwankungen der Ionisation der Atmosphäre und die dadurch bedingten Schwankungen des Potentialgefälles nicht, wie Arrhenius meint, auf die Änderung einer von außerirdischen Quellen stammenden durchdringenden Strahlung, sondern auf Strömungen in den unteren Schichten der Atmosphäre und auf Kondensationen des Wasserdampfes zurückzuführen sind, glaube ich bereits gezeigt zu haben. Gegen die Existenz einer solchen Strahlung spricht auch der Umstand, daß Gockel und

Wulf im Hochgebirge keine Änderung der Ionisation in einem geschlossenen Gefäße mit der Höhe nachweisen konnten.

Die Ionisation eingeschlossener Gase wird verringert, wenn man die Gefäßwände mit Schmirgelpapier abreibt. Diese Beobachtung beweist, daß sich alle, der Atmosphäre ausgesetzte Körper mit einer unsichtbaren Haut von radioaktiver Materie überziehen.

Die stark durchdringende Strahlung, die an der Erdoberfläche von allen Seiten zu kommen scheint, ist, wie Elster und Geitel zeigten¹⁾, in einem Steinsalzbergwerk bedeutend geringer als in freier Luft. Es scheint demnach, daß das Steinsalz eine Schirmwirkung gegen die durchdringende Strahlung ausübt. Ist diese letztere identisch mit den γ -Strahlen der in der Atmosphäre enthaltenen Zerfallsprodukte des Radiums, so erscheint die Verminderung der Strahlung in einem Bergwerk erklärlich. Man muß aber nach den oben beschriebenen Versuchen annehmen, daß auch die Gesteine selbst, besonders Ton, Strahlen hoher Durchdringungsfähigkeit aussenden, faktisch beobachteten Gockel und Wulf auch diese Wirkung im Simplontunnel.

Andererseits zeigten Versuche, die teils mit einem Apparat, ähnlich dem von Elster und Geitel verwendeten, teils mit einem von Wulf hierfür besonders konstruierten angestellt wurden, daß die durchdringende Strahlung in der freien Atmosphäre stärker sein kann als in Zimmern oder Kellern.

Aufschluß darüber, ob diese durchdringende Strahlung wirklich von den in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Induktionen herrührt — die Emanation kommt, weil nur α -Strahlen aussendend, nicht in Betracht — ist von Bestimmungen der täglichen Periode des Gehaltes der Atmosphäre an diesen Produkten zu erwarten. Leider sind aus den früher (S. 183) dargelegten Gründen die nach der von Elster und Geitel angegebenen Methode ausgeführten Messungen der Aktivierungskonstante A für den vorliegenden Zweck nicht zu verwenden, dagegen eignen sich hierzu die Messungen Dikes, der, wie oben angegeben fand, daß der Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen Maxima erreicht um 1^h a und 4^h a, ein Minimum dagegen um 4 p. Wie man sieht, liegt kein Zusammenhang mit der täglichen Periode der Ionisation in geschlossenen Gefäßen vor. Damit ist nun aller-

1) Phys. Zt. 6, 733, 1905.

2) Terr. Mag. 11, 125, 1906.

dings noch nicht bewiesen, daß die von den radioaktiven Induktionen ausgehende γ -Strahlung gar keinen Einfluß auf die Ionisation in geschlossenen Gefäßen besitzt, sondern nur daß derselbe hinter der Wirkung anderer Faktoren zurückbleibt.

Mc. Keon¹⁾ glaubt aus dem Umstand, daß die tägliche Periode der durchdringenden Strahlung an den verschiedensten Orten dieselbe ist, schließen zu dürfen, daß diese Periode eine Folge der Sonnenstrahlung ist, und ist daher geneigt, sich der von Richardson gegebenen Erklärung anzuschließen. Näher dürfte es wohl liegen, die tägliche Schwankung der durchdringenden Strahlung als eine Folge der halbtägigen Schwankung des Luftdruckes aufzufassen, deren Extreme ebenfalls an fast allen Punkten der Erde auf die gleichen Ortszeiten fallen. Auch diese Schwankung ist ja in letzter Linie eine Folge der Sonnenstrahlung, resp. der durch diese hervorgerufenen Erwärmung der Atmosphäre. Diese Erklärung setzt nun auch wieder voraus, daß der größte Teil der durchdringenden Strahlung von den in der Atmosphäre vorhandenen radioaktiven Produkten herrührt. Es spricht dafür die auch vom Verfasser bestätigte Beobachtung Maches, daß während eines Regens eine sehr starke Zunahme der durchdringenden Strahlung eintritt, die nach dem Aufhören des Regens bald wieder rasch abklingt. Gegen die Folgerung Maches, daß die Ursache dieser vorübergehenden, verstärkten Strahlung in den von den Niederschlägen auf die Erde gebrachten Zerfallsprodukten des Radiums, hauptsächlich Radium B und C liegt, wird sich kaum etwas einwenden lassen, zumal, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, die Niederschläge tatsächlich radioaktive Stoffe enthalten. Andererseits fand Mc. Lennan²⁾, daß die durchdringende Strahlung über dem Wasser oder dem Eis des Ontariosees um ein Fünftel bis ein Drittel geringer ist als über dem Lande. Aus dieser Beobachtung folgt, daß der größere Teil der durchdringenden Strahlung aus dem Erdboden stammt. Mit diesem Befund stimmen auch die oben erwähnten Messungen von Eve überein, dagegen widersprechen ihm Versuche Strongs³⁾.

7. Radioaktivität der Niederschläge. C. T. Wilson⁴⁾ hat zuerst bemerkt, daß der Rückstand, den er beim Eindampfen von

1) T. F. Mc. Keon, Phys. Rev. **25**, 399, 1907.

2) J. C. Mc. Lennan, Nature **77**, 607, 1908; Phys. Zt. **9**, 440, 1908.

3) R. W. Strong, Phys. Zt. **9**, 117, 1908; Phys. Rev. **26**, 518, 1908.

4) C. T. Wilson, Proc. of the Cambridge Phil.-Soc. **11**, 428, 1902.

Regenwasser erhielt, die Eigenschaft hatte, Luft durch Aluminiumfolie hindurch leitend zu machen, also α -Strahlen aussandte. Ein noch stärker radioaktives Produkt erhielt er, wenn er dem Regenwasser etwas Chlorbaryum zusetzte und dann mit Schwefelsäure ausfällte oder noch besser durch Ausfällen mit Ammoniak nach Zusatz von etwa 1 g Alaun auf 1 Liter Regenwasser. Das nach dieser Operation eingedampfte Filtrat erwies sich als vollständig inaktiv. Zu denselben Resultaten kam Allan¹⁾ bei Verwendung von Schnee. Eingehender haben in neuerer Zeit die Radioaktivität der Niederschläge untersucht Jaufmann²⁾ in der Umgebung von München und Costanzo und Negro³⁾ in Bologna. Der erstere verwendet die von Wilson angegebene Methode der Ausfällung der radioaktiven Stoffe durch Zusatz von Alaun und Ammoniak, die letzteren brachten die gesammelten Niederschläge direkt in den Metallzylinder des Elster- und Geitel'schen Zerstreungsapparates. Übereinstimmend ergaben alle bisherigen Versuche: a) Atmosphärische Niederschläge führen stets radioaktive Produkte mit sich, deren Aktivität in 30—50 Minuten auf die Hälfte fällt, die also wahrscheinlich aus Radium C und vielleicht noch anderen Stoffen (Thoriuminduktionen) bestehen; Emanation ist weder im Regen noch im Schmelzwasser des Schnees enthalten; b) die aus Böen und Gewitterregen, besonders aber von Hagel stammenden Niederschläge sind radioaktiver als die der schwachen Regen; c) frisch gefallener Schnee ist unter gleichen Bedingungen radioaktiver als Regen; d) der auf Dächer und ebenso nach Beobachtungen von Gockel und Wulf der auf Gletscher fallende Schnee zeigt nach hundert Stunden kaum noch Zeichen von Radioaktivität.

Auf dem Erdboden lagernder Schnee kann seine Radioaktivität tagelang bewahren, was sich durch die Aufnahme neuer Emanation aus dem Boden erklärt. Nach Jaufmann ist der Gang dieser Aktivität der des Barometers entgegengesetzt.

Gar nicht oder sehr schwach aktiv erwiesen sich die von Jaufmann⁴⁾ auf der Zugspitze gesammelten Niederschläge. Während im Flachlande im Mittel durch die von einem Liter Wasser herabgeführten radioaktiven Stoffe 1000—3000 Ionen pro Sekunde

1) S. J. Allan, Phys. Rev. **16**, 306, 1906 u. Phil. Mag. **7**, 140, 1904.

2) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **22**, 102, 1905.

3) G. Costanzo u. C. Negro, Phys. Zt. **7**, 350 u. 920, 1906; Atti d. Pont. Accad. dei Nuovi Lincei, **60**, 1906 u. **61**, 1908.

4) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **24**, 337, 1907.

im Kubikzentimeter Luft gebildet werden, wurde für die Bergstation der Betrag von 500 Ionen pro Sekunde und Kubikzentimeter niemals überschritten. Jaufmann zieht daraus den Schluß, daß die auf dem Hochgipfel untersuchten Niederschläge geringere Schichten und an aktivierenden Bestandteilen weniger reiche Luft durchfallen als die in den Tiefstationen fallenden. Angesichts des Umstandes, daß die den Gipfel umgebende Luft reich an Emanation ist, scheint mir nur der erste Teil dieses Schlusses gerechtfertigt, außerdem konnten Gockel und Wulf in Höhen von 2600 m keinen Unterschied in der Radioaktivität der Niederschläge gegenüber dem Tiefland feststellen.

Bemerkenswert ist, daß auf der Zugspitze der Rauhrost, der sich manchmal auf dem zur Untersuchung der Luftaktivität dienenden Draht bildete, jedesmal eine den obwaltenden meteorologischen Verhältnissen entsprechende Radioaktivität aufwies, während der Draht selbst unter diesen Umständen inaktiv war.

8. Andere in der Atmosphäre wirksame Ionisatoren. Für die Erzeugung von Ionen in den unteren Schichten der Atmosphäre kommt außer den radioaktiven Stoffen noch die Seite 47 besprochene Ionisierung durch Niederschläge in Betracht. Dieselbe kann aber nur in Niederschlagsgebieten oder in unmittelbarer Nähe derselben eine Rolle spielen, desgleichen kommt der auf demselben Wege entstehenden Wasserfallelektrizität nur eine lokale Bedeutung zu. Ferner sind die ultravioletten Strahlen, wie Elster und Geitel¹⁾ zeigten, auch nachdem sie die Erdatmosphäre durchlaufen haben, noch imstande, an einigen Stoffen, die allerdings als Bestandteile der dem Lichte ausgesetzten Erdschichten nur eine geringe Rolle spielen, wie Flußspat, auch frischem Granit, einen sogenannten Hallwachseffekt hervorzurufen, d. h. negative Ionen aus diesen Körpern in die Luft übertreten zu lassen. Bei den meisten Stoffen, welche unsere Erdrinde bilden, vor allem auf den mit Wasser oder Vegetation bedeckten Teilen der letzteren, ist der Hallwachseffekt unmerklich.

Brillouin²⁾ zieht aus der Beobachtung, daß negativ geladenes Eis, unter dem Einfluß ultravioletter Bestrahlung eine positive Ladung annimmt, den Schluß, daß Cirruswolken positiv geladen

1) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. 44, 722, 1891.

2) Brillouin, Journ. de Phys. 9, 91, 1900.

sein müssen. Umgekehrt suchte Rudolph¹⁾ durch die lichtelektrischen Entladungen das Vorwiegen positiver Ionen in den oberen Luftschichten zu erklären. Sind aus irgend einem Grund, vielleicht infolge der Einwanderung von der Sonne her, in den obersten Luftschichten negativ geladene Stäubchen vorhanden, so müssen dieselben sich unter dem Einfluß der ultravioletten Strahlung entladen, es bilden sich dabei nach den Versuchen von Lenard²⁾ Kathodenstrahlen von geringer Durchdringungsfähigkeit, welche die Luft stark ionisieren. Die negativen Ionen können wegen ihrer größeren Beweglichkeit von den Stäubchen stärker absorbiert werden als die positiven. Es bleiben also positive Ionen im Überschuß zurück, andererseits entstehen wieder neue, negativ geladene Staubkerne, die von neuem zu dem Wechselspiel Veranlassung geben. Die Hypothese scheint mir zu fallen mit dem von Simpson³⁾ geführten Nachweis, daß eine negative Ladung isolierter Leiter, die frei der Luft ausgesetzt sind, gar nicht stattfindet, und zwar deshalb nicht, weil das bei der Absorption der Ionen einer Art sich ausbildende Feld dem Weiterschreiten des Prozesses sofort ein Ende setzt.

Nach den Versuchen Lenards⁴⁾ kann es keinem Zweifel unterliegen, daß die obersten Schichten der Atmosphäre durch die ultraviolette Sonnenstrahlung ionisiert werden, wenn auch nach L. Bloch⁵⁾ diese Wirkung an das Vorhandensein kleiner Staubpartikelchen geknüpft ist. Die Größe dieser Ionisation muß eine ausgesprochen tägliche Periode haben. Inwieweit sich diese Ionisierung auch in tieferen Schichten fühlbar macht, entzieht sich noch unserer Beurteilung. Ebenso wenig sind wir, wie bereits bemerkt, imstande zu entscheiden, ob die von Arrhenius und anderen behauptete Ionisierung durch von der Sonne ausgehende Elektronenstrahlen wirklich stattfindet.

Versuche über den Zusammenhang zwischen Potentialgefälle und ultravioletter Sonnenstrahlung haben Elster und Geitel⁶⁾ angestellt. Sie fanden, daß im allgemeinen das Potentialgefälle einen

1) H. Rudolph, Luftpotezialität und Sonnenstrahlung, Leipzig 1903; Met. Zt. 21, 213, 1904.

2) Ph. Lenard, Ann. d. Phys. 8, 149, 1901.

3) G. C. Simpson, Phil. Mag. 6, 589, 1903.

4) Ph. Lenard, Ann. d. Phys. 1, 486, 1900.

5) L. Bloch, Le Radium 5, 246, 1908; C. R. 146, 892, 1908.

6) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. 48, 338, 1903.

umgekehrten Gang einschlägt wie die Strahlung. Aus dem in Kap. 2, § 9 und 11 Gesagten ergibt sich, daß dieser Zusammenhang kein direkter ist, sondern offenbar vermittelt wird, durch die mit der Strahlung steigende Temperatur und Leitfähigkeit. Das Instrument, dessen sich die genannten Forscher bei den erwähnten Messungen bedienten, haben sie in neuerer Zeit durch einen auf demselben Prinzip beruhenden handlicheren Apparat ersetzt¹⁾.

Liebenow²⁾ sieht die Quelle der Luftpotelektrizität in thermoelektrischen Kräften, welche in der Atmosphäre zwischen den unteren warmen und oberen kalten Schichten wirken. Die Temperaturdifferenz soll einen von unten nach oben gehenden Strom hervorbringen. Auch zwischen Regentropfen und anders temperierter umgebender Luft sollen thermoelektrische Kräfte existieren, wodurch sich dann die Wolkenentladungen erklären. Zur Erklärung der Einzelheiten sind viele Hypothesen erforderlich; auch sind die Grundlagen der Theorie nicht einwandfrei³⁾.

Schlußbetrachtungen.

Wir kehren zu unserem Ausgangspunkt, der Frage zurück, wie erhält sich trotz der Leitfähigkeit der Atmosphäre die Potentialdifferenz zwischen ihr und der Erde.

Die älteren Hypothesen, welche, wie die von Ermann, Peltier usw., die Existenz eines elektrischen Feldes der Erde als gegeben betrachteten und nur die Abhängigkeit desselben von den meteorologischen Elementen sowie die periodischen Schwankungen zu erklären versuchten, können wir unberücksichtigt lassen. Auf Grund der Ionentheorie haben zuerst Elster und Geitel⁴⁾ die Existenz des elektrischen Erdfeldes zu erklären versucht. Auf Grund der größeren Beweglichkeit der negativen Ionen glaubten sie annehmen zu können, daß solche so lange in verstärktem Maße von der Erde absorbiert würden, bis das entstehende Erdfeld ein verstärktes Ein-

1) Elster und Geitel, Phys. Zt. **5**, 238, 1904; Zt. f. Instrmkd. **24**, 280, 1904; Terr. Mag. **11**, 1, 1906,

2) C. Liebenow, Die atmosphärische Elektrizität. Halle a. S. 1900.

3) Einwände siehe Phys. Zt. **2**, 343, 1901.

4) J. Elster u. H. Geitel, Terr. Magn. **4**, 230, 1899.