

2. Über *Ionenadsorption an fallenden Wassertropfen;* *von R. Seeliger.*

I. Einleitung.

Im Jahre 1902 veröffentlichte Hr. Schmauss in diesen Annalen eine Arbeit über die „Aufnahme negativer Elektrizität aus der Luft durch fallende Wassertropfen“. Das Resultat, zu welchem Schmauss gelangt, ist kurz folgendes: Wenn man durch Luft, die von Röntgenstrahlen ionisiert wurde, Wassertropfen fallen läßt, so nehmen diese aus ihr negative Elektrizität und zwar in ziemlich beträchtlicher Menge auf, sie kommen also am Ende ihrer Bahn negativ geladen an; fängt man sie dort auf, so zeigt das Auffangegefäß eine negative Aufladung. Während ein Tropfen durch die Luft fällt, werden infolge ihrer größeren Beweglichkeit negative Ionen in größerer Menge an ihn herantreten als positive und dort ihre Ladungen abgeben. Durch die Weiterbewegung des Tropfens werden dann die auf ihm gesammelten negativen Ladungen von den gleich großen positiven getrennt, die in der Umgebung infolge des nun herrschenden Überschusses positiver Ionen vorhanden sind. Man faßt diese und ähnliche Erscheinungen unter der Bezeichnung „Adsorption der Ionen“¹⁾ zusammen, und sie scheinen im Elektrizitätshaushalte der Atmosphäre eine nicht unbeträchtliche Rolle zu spielen. Es wurden nun die Versuche von Schmauss mehrfach dazu herangezogen²⁾, in ihrer Übertragung auf Regentropfen zur Erklärung luftelektrischer Fragen beizutragen. Da meines Wissens die Ergebnisse des genannten Autors noch nie nachgeprüft wurden, so möchte ich in folgendem kurz über einige

1) Ausführliches darüber sowie Literaturangabe bei Ebert, Jahrb. f. Elektronik 3. p. 61.

2) Z. B. bei Wilson, On Thunderstorm Electricity, Phil. Mag. p. 636. 1909.

Versuche berichten, die denselben Gegenstand behandeln und mich zu ganz anderen Resultaten geführt haben. Ich möchte jedoch gleich hier bemerken, daß eine etwa bis auf wenige Prozent genaue Messung der beobachteten Effekte wegen deren Kleinheit und wegen einiger experimenteller Schwierigkeiten, deren Überwindung mir trotz langer Bemühungen nicht möglich war, nicht gelungen ist. Dagegen konnte ich zeigen, daß die von Schmauss gefundenen Werte für die adsorbierten Mengen negativer Elektrizität sicher viel zu hoch sind, und die Größenordnung der tatsächlichen Werte innerhalb enger Grenzen angeben. Da das hier behandelte Problem wesentlich Interesse in seiner Anwendung auf die Fragen der Lufterlektrizität beansprucht und dabei stets eine Extrapolation von den Versuchen im Laboratorium auf die Verhältnisse in der freien Atmosphäre nötig sein wird, so schien es mir unnötig, eine noch größere Genauigkeit der Versuchsergebnisse anzustreben. Doch werde ich bei der Beschreibung der Versuchsanordnung die auftretenden Schwierigkeiten ausführlich diskutieren, um dadurch eine in dieser Richtung etwa weitergehende Untersuchung zu erleichtern.

Das Prinzip der Versuche ist ein äußerst einfaches. Aus einem Tropfapparat *T* (vgl. Fig. 1) fällt pro Minute durch einen

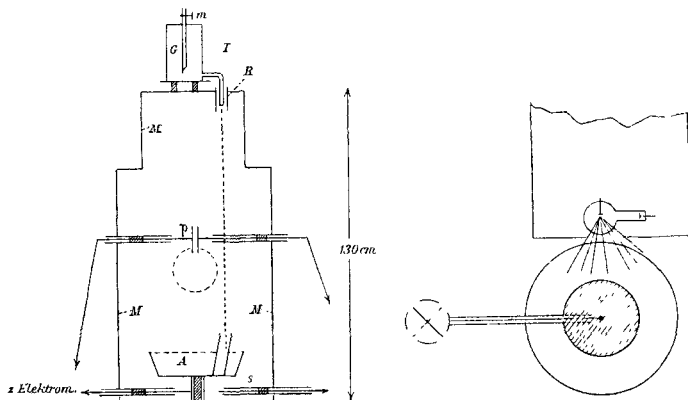


Fig. 1.

großen Blechzylinder *M* eine bestimmte Wassermenge in das mit dem Quadrantenelektrometer verbundenen Auffanggefäß *A*.

Die Luft, durch welche die Tropfen fallen, ionisierte ich ebenso wie Schmauss durch Röntgenstrahlen; die dem System $A +$ Elektrometer pro Minute mitgeteilte Ladung gibt dann — wenn man zunächst von störenden Nebeneffekten absieht — direkt die von dem herabfallenden Wasser adsorbierte Elektrizitätsmenge an. Dabei sind nun zwei wesentlich voneinander verschiedene Arten von Beobachtungen zu unterscheiden. Man kann einmal die Größe der aufgenommenen Ladung messen, wenn die Röntgenröhre während des ganzen Versuches in Gang bleibt. Dann fallen die aufeinanderfolgenden Tropfen stets durch Luft von relativ hoher Ionendichte; jeder Tropfen findet an jedem Punkte seines Weges dieselbe Menge positiver und negativer Ionen vor wie der vorhergehende, d. h. von einer „Ausionisierung“ im Sinne von Schmauss kann keine Rede sein, da von den Röntgenstrahlen stets neue Ionen nachgebildet werden. In diesem Falle fand ich nun nach Elimination sämtlicher störender Nebeneffekte eine geringe negative Ladung der aufgefangenen Tropfen. Es scheint mir dieser Versuch deshalb wichtig, weil er den bei einem in der Atmosphäre fallenden Regen herrschenden Umständen, wenigstens was die qualitative Seite anlangt, entsprechen dürfte. Auch hier haben wir es mit einem beständig wirkenden Ionisator zu tun, so daß eine Ausionisierung durch die ersten herabfallenden Regentropfen nur unter gewissen Umständen stattfinden kann. Die zweite Art der Beobachtung war eine direkte Wiederholung der Versuche von Schmauss. Die von den Tropfen adsorbierte Ladung wurde erst einige Zeit nach Abstellung der Röntgenröhre gemessen. In diesem Falle konnte ich nun, im Gegensatz zu Schmauss, keine Spur einer solchen auffinden. Es entspricht dies der Tatsache, daß die unter diesen Umständen adsorbierte Elektrizitätsmenge unterhalb der Empfindlichkeitsgrenze meines Apparates lag. Daß in dem zuletzt angegebenen Fall die adsorbierte Ladung so klein ist, erscheint ganz plausibel, wenn man folgendes bedenkt. In der Zwischenzeit zwischen der Abstellung der Röntgenröhre und der Beobachtung vermindert die Rekombination der Ionen die Ionendichte in dem von den Tropfen durchfallenen Raum ganz beträchtlich, so daß wir es mit viel kleineren Ionendichten zu tun haben als im ersteren Fall. Die ersten herabfallenden

Tropfen werden nun zwar sicher eine geringe Ladung adsorbieren, doch wird diese bei den folgenden schnell abnehmen, da eine Nachlieferung neuer Ionen nun nicht mehr stattfindet. An eine solche in genügendem Maße infolge der Diffusion der Ionen kann bei der geringen Diffusionsgeschwindigkeit (Diffusionskoeffizient für feuchte Luft = 0,033) wohl kaum gedacht werden.

II. Fehlerquellen.

Die tatsächlich beobachtete Aufladung des Auffangegefäßes stellt nun in Wirklichkeit keineswegs die von den herabfallenden Tropfen adsorbierte Ladung dar. Vielmehr überlagern sich über diesen eigentlichen „Adsorptionseffekt“ drei andere Effekte, die gesondert betrachtet und eliminiert werden müssen. Diese sind:

1. „*Der Water-Droppereffekt*“ (einer Bezeichnung Lord Kelvins folgend). Wir wollen so einen Effekt nennen, der bei der Lostrennung der Tropfen von der Abtropfstelle entsteht und in einer den Tropfen von Anfang an beigegebenen Eigenladung besteht. Je nach dem Vorzeichen dieser Ladung wird also dieser Effekt die von den Tropfen mit herunter gebrachte und gemessene Ladung größer oder kleiner erscheinen lassen, als die, welche sie erst auf ihren Weg durch das ionisierte Gas infolge der Adsorption erhalten.

2. „*Der Lenardeffekt*“ tritt beim Auffallen des Wassers auf das Auffangegefäß auf.¹⁾ Bei Verwendung von Münchener Leitungswasser erhält dieses dadurch eine schwache positive Aufladung.

3. „*Der Aufladungseffekt*“. Zwischen dem Auffangegefäß und dem, die ganze Anordnung nach außen abschließenden großen Blechgefäß *M*, wird stets, auch wenn beide aus demselben Material gefertigt sind, eine kleine Potentialdifferenz bestehen. Diese wird bewirken, daß sich das Gefäß je nach der Richtung dieser Potentialdifferenz in dem einen oder anderen Sinne auflädt, sobald in dem Raum zwischen beiden freie Ionen vorhanden sind. Je nach der Ionendichte wird diese Aufladung schneller oder langsamer vor sich gehen, jedenfalls aber zu der vom Elektrometer angezeigten gesamten Auf-

1) P. Lenard, Wied. Ann. 46. p. 584. 1892.

ladung einen Beitrag liefern, der keineswegs vernachlässigt werden darf. Weitere störende Effekte, die etwa durch die auf A auffallenden Röntgenstrahlen und die dadurch bedingte Aussendung von Elektronen hervorgerufen werden, kommen nicht in Betracht, da es stets nur auf die Beobachtung von Differenzen ankommt, bei denen derartige Wirkungen herausfallen.

III. Versuchsanordnung.

Der von mir benutzte Apparat bestand im wesentlichen aus einem gut isolierten Auffangegefäß A , das zum Schutze von einem großen Blechkasten M aus demselben Material (Weißblech) umgeben war, und aus einer Tropfvorrichtung T , von der aus Wasser nach A herabfiel. Das Gefäß A war durch eine sorgfältig elektrostatisch geschützte Leitung mit dem Quadrantenelektrometer verbunden, dessen Empfindlichkeit 370 mm pro 1 Volt bei 3 m Skalenabstand betrug. Vor und nach jeder Versuchsreihe wurde die Empfindlichkeit mit Hilfe einer Sonde s nachkontrolliert; dieselbe Sonde konnte auch dazu dienen, um dem System Auffangegefäß + Elektrometer eine bestimmte Ladung mitzuteilen. In der Mitte des Blechkastens M war ein Plattenkondensator p angebracht; die eine Platte konnte mit dem Elektrometer, die andere mit einer Hochspannungsbatterie verbunden werden, so daß man den Sättigungsstrom zwischen den Platten und damit die Stärke des wirkenden Ionisators messen konnte. Alle vorkommenden Isolationen waren aus den, bei luftelektrischen Untersuchungen allgemein üblichen gerieften Hartgummiträgern mit Natriumtrocknung gebildet und haben sich stets sehr gut bewährt, obwohl wegen der in M vorhandenen hohen Feuchtigkeit große Anforderungen an sie gestellt wurden.

1. Die meisten Schwierigkeiten machte die Konstruktion eines geeigneten Tropfapparates. Es handelte sich darum, in das Gefäß A eine bestimmte Wassermenge oder eine bestimmte Anzahl von Tropfen konstanter Größe herunterfallen zu lassen. Die pro Minute herabfallende Menge konnte leicht konstant gehalten werden, da das Gefäß G als Mariottesche Flasche ausgebildet war. Ein Mikrometerhahn m , welcher den Luftzutritt regelte, erlaubte die gewünschte Ausflußmenge sehr

genau einzustellen. Denken wir uns nun den Tropfapparat in Tätigkeit gesetzt, so daß etwa eine bestimmte Anzahl von Tropfen pro Minute (gewöhnlich 200) herabfällt und von dem Gefäß *A* aufgefangen wird. Wenn nun *T* mit der Erde oder mit *M* leitend verbunden ist, so wird jeder Tropfen eine bestimmte Elektrizitätsmenge ϵ mit herunterbringen; denn da zwischen der aus Metall hergestellten Ausflußkapillare und den Metalloberflächen der Umgebung (es kommt hier wohl in erster Linie die Oberfläche einer Röhre *R* in Betracht, durch welche die Kapillare zum Schutz gegen Luftströmungen und dergl. hindurchgeführt ist) stets eine kleine Potentialdifferenz besteht, so wird der ganze Apparat wie ein Tropfkollektor wirken, nur mit dem Unterschiede, daß die von jedem einzelnen Tropfen fortgeführte Ladung sich nicht asymptotisch dem Werte Null nähert, wie dies bei isoliertem Ausflußgefäß der Fall sein müßte.¹⁾ Da man nun in der Literatur häufig derartige Tropfkollektoren verwendet findet²⁾, möchte ich in folgendem zunächst auf einige Erscheinungen eingehen, die bei ähnlichen Versuchsanordnungen sehr wohl zu bedeutenden Fehlerquellen Veranlassung geben könnten. Zunächst ist klar, daß das Vorzeichen und die Größe der Tropfenladung ϵ von dem Material der Tropfkapillare *S* und dem des umgebenden Rohres *R* abhängen werden. Bei Benutzung verschiedener Metalle ergeben sich so z. B. die folgenden Werte (in willkürlichen Einheiten).

<i>R</i>	Messing			Zink
<i>S</i>	Kupfer	Zinn	Zink	Zinn
ϵ	-37	+30	+77	-90

Man sieht, daß die aus dieser kleinen Tabelle sich ergebende Anordnung der Metalle genau die der Spannungsreihe ist. Das Arbeiten mit nicht isoliertem Tropfapparat würde also ein sehr bequemes Mittel bilden, um den Tropfen von

1) Vgl. z. B. F. G. H. Linke, Diss. Berlin 1901.

2) Z. B. Ch. Nordmann, Compt. rend. 138. p. 1418 u. 1596. 1904; 140. p. 430. 1905.

Anfang an eine bestimmte Eigenladung zu erteilen und so den Einfluß dieser etwa auf die Größe der Adsorption zu untersuchen. Doch steht dem ein Mißstand gegenüber, den ich trotz langer Bemühungen nicht beheben konnte. Die Größe von ϵ bleibt nämlich nicht konstant, sondern ändert sich mit der Dauer des Abtropfens stetig, um einem dann konstant bleibenden Endwert zuzustreben. Doch wechselte sowohl die Geschwindigkeit der Änderung wie auch die Größe dieses Endwertes von Versuch zu Versuch in ganz unkontrollierbarer Weise trotz aller erdenklichen Vorsicht. (So hatte z. B. auch eine starke Vergoldung der Tropfspitzen keinen Erfolg.) Diese Inkonstanz der Tropfenladung scheint mir auf einer geringen Veränderung der in Betracht kommenden Metalloberflächen zu beruhen. So änderte sich z. B. ϵ sprungweise um etwa 30 Proz., wenn die Endkuppe der Kapillare leicht mit etwas Watte abgewischt wurde. Es kann dies nicht verwundern, wenn man die große Empfindlichkeit des Voltaeffektes gegen geringste Veränderungen der in Betracht kommenden Oberflächen bedenkt.¹⁾

Da ich nun bei meinen Versuchen voraussetzen mußte, daß der Wert von ϵ , d. h. der unter II. erwähnte Water-Droppereffekt zum mindesten während eines Versuches konstant bleibt, so war ich gezwungen mit isoliertem Tropfgefäß zu arbeiten. Paraffin erwies sich dabei leider als Isolationsmittel als unbrauchbar wegen seiner großen Empfindlichkeit gegen Druck und Reibung, die sich beim Aufsetzen der Mariotteschen Flasche und beim Einstellen des Mikrometerhahnes nie ganz vermeiden lassen. Ich benutzte schließlich ein Metalltischchen mit drei aus gerieften Ebonitsäulen bestehenden Füßen. Endlich erwies es sich als notwendig, die ganze Tropfanordnung gegen äußere elektrostatische Einflüsse durch einen geerdeten Drahtkäfig zu schützen, der zum Schutz gegen die Röntgenstrahlen allseitig mit Blei umkleidet war. Bei Ausführung der Versuche zeigte es sich nun, daß der Water-Droppereffekt nach Ingangsetzung des Apparates sehr schnell kleiner wurde, daß er jedoch nicht bis auf Null her-

1) Vgl. A. Winkelmann, Handb. 4. p. 178 f.; oder als besonders typisches Beispiel W. Hallwachs, Wied. Ann. 29. p. 1. 1886.

untersank, wie dies bei vollständiger Isolation hätte sein müssen, sondern daß ein konstanter, wenn auch sehr kleiner Endwert erreicht wurde. Ich glaube dies durch nicht vollständige Isolation des Tropfgefäßes, oder durch das Bestehen eines Ionenstromes zwischen der metallenen Mariotteschen Flasche und dem umgebenden Drahtnetz erklären zu können.

2. Den beim Auffallen der Tropfen bestehenden Lenardeffekt konnte ich auf ein Minimum herabdrücken, dadurch, daß ich die Tropfen in ein schräggestelltes Rohr fallen ließ. Sie trafen etwa 5 cm unterhalb der oberen Rohrmündung dessen Wand und glitten an derselben, ohne in nennenswerter Weise zu zerspritzen, hinab in das größere Sammelgefäß. Viel günstiger als die Verwendung von destilliertem Wasser, das trotzdem einen nicht unbeträchtlichen Lenardeffekt ergab, war die Benutzung von gewöhnlichem Leitungswasser.¹⁾ Bei diesem war die Aufladung infolge des Lenardeffektes jedenfalls verschwindend gering, wenigstens solange ich einzeln fallende Tropfen benutzte. Später habe ich wie Schmauss einen kontinuierlichen Wasserstrahl benutzt, der sich erst auf seinem Wege in einzelne Tropfen auflöste, und in einem Blechzylinder mit Drahteinlagen aufgefangen wurde. Es ergab sich für diesen Fall ein geringer, jedoch durchaus konstanter Betrag für den Lenardeffekt. Die Kapazität der ersten Auffangevorrichtung zusammen mit der des Elektrometers und der Zuleitung war 65,0 cm, die der zweiten Anordnung ebenso 98,9 cm (bestimmt mit dem Harmsschen Kondensator durch Ladungsteilung).

Zum Schlusse möchte ich noch bemerken, daß die Röntgenröhre und das dieselbe speisende Induktorium in einem großen bleibeschlagenen Kasten untergebracht war. Ein Fenster gestattete den Austritt der Strahlen. Das Elektrometer war außerdem durch mehrere dicke Bleischirme und durch ein gerichtetes engmaschiges Drahtnetz geschützt. Es wurde durch den Betrieb der Röntgenröhre in keiner Weise beeinflusst.²⁾

1) Ähnliches bemerkt Lenard für das Bonner Leitungswasser l. c.

2) Daß die Strahlung den ganzen Kasten annähernd homogen erfüllte, stellte ich durch Abtasten mit einem Fluoreszenzschirm fest.

IV. Gang und Resultat der Versuche

1. *Versuche bei dauernder Bestrahlung.* — Es handelte sich zunächst darum, die von einem Tropfen adsorbierte negative Ladung zu bestimmen, wenn dieser Tropfen durch Luft fiel, die während des ganzen Versuches von Röntgenstrahlen ionisiert wurde. Es tropften pro Minute 200 Tropfen ab, der Radius jedes Tropfens war 0,25 cm, die Fallhöhe betrug 90 cm. Der Gang eines jeden Versuches war der folgende. Zunächst wurde bestimmt, welche Ladung dem Auffangegefäß durch die Tropfen mitgeteilt wurde, wenn die Luft im Kasten *M* nicht künstlich ionisiert war. Diese Aufladung war hervorgerufen durch die Überlagerung der drei Effekte, die unter II. angegeben sind. Der Aufladungseffekt war nämlich infolge der in einem geschlossenen Raum stets vorhandenen, wenn auch schwachen, natürlichen Ionisation noch bemerkbar, wenn die Röntgenröhre nicht in Tätigkeit war. Stellte man den Tropfapparat ab, so konnte der Betrag des letzteren Effektes für sich bestimmt werden. Man erhält so die Ladung, welche 200 Tropfen an das Auffangegefäß abgeben + der Ladung infolge des Lenardeffektes.

Wurde nun die Röntgenröhre in Tätigkeit gesetzt, so wanderte die Nadel erst schnell, dann mit stetig abnehmender Geschwindigkeit einer Grenzlage zu, welche also direkt die Potentialdifferenz zwischen dem Auffangegefäß und dem Mantel *M* angibt. Wenn nun der Tropfapparat in Tätigkeit gesetzt wurde, so mußte sich, falls die Tropfen eine negative Ladung mit herunterbrachten, die Nadel nun von neuem, und zwar nach der negativen Seite hin verschieben. Der Betrag dieser Verschiebung zeigte an, welche Ladung dem Auffangegefäß nun von den 200 Tropfen und infolge des Lenardeffektes mitgeteilt wurde. Unter der Annahme, daß der letztere konstant geblieben war, ergibt die Differenz dieser und der oben (ohne künstliche Ionisation) erhaltenen Aufladung, die durch die 200 Tropfen adsorbierte Elektrizitätsmenge. Um zu bestimmen, welche pro Minute dem System mitgeteilte Ladung dieser neuerlichen Nadelverschiebung entspricht, haben wir uns folgendes klar zu machen: Wenn die Nadel ihre erste Ruhelage erreicht hat, so ist die Potentialdifferenz zwischen *A* und *M*

nahezu ausgeglichen. Die geringe noch bestehende Differenz unterhält einen Ionenstrom zwischen diesen beiden Metallflächen, der eben hinreicht, dem kleinen Ladungsverlust durch unvollkommene Isolation das Gleichgewicht zu halten. Der Aufladungseffekt ist also fast Null. Wenn nun die Nadel nach Ingangsetzung des Tropfapparates sich in einer neuen Lage einstellt, so muß offenbar die Beziehung gelten:

$$\begin{aligned} &\text{Lenardeffekt} + \text{pro Minute von den Tropfen mitgebrachte} \\ &\text{Ladung} = \text{Aufladungseffekt} + \text{Isolationsverlust.} \end{aligned}$$

Wenn wir also die Zerstreuungskurve¹⁾ aufnehmen und an sie in dem der zweiten Ruhelage des Elektrometers entsprechenden Punkte die Tangente legen, so können wir den Betrag der rechten Seite obiger Gleichung bestimmen. Die „Zerstreuungskurve“ ergibt sich, wenn man A mittels der Sonde (auf etwa 1 Volt) auflädt und nun den Rückgang der Ladung etwa von 15 zu 15 Sek. notiert. Um das eben Gesagte klarer zu machen, möchte ich noch einen beliebig herausgegriffenen Versuch in extenso mitteilen:

1. Ohne Tropfen und ohne Strahlen.		2. Mit 200 Tropfen und ohne Strahlen.	
Zeit in Min.	Ausschlag	Zeit in Min.	Ausschlag
0	500	0	500,0
1	502	1	507,0
2	505,0	2	514,0
3	508,0	3	520,5
4	510,5	4	527,5
5	513,0	5	533,5
Mittl. Aufladung } pro Min. }		2,6	Mittl. Aufladung } pro Min. }
			6,7

Es ist also ohne künstliche Ionisation die von 200 Tropfen verursachte Aufladung + Lenardeffekt gleich $6,7 - 2,6 = 4,1$ Skt. pro Minute.

1) Es sei hier bemerkt, daß „Aufladung“ und „Zerstreuung“ natürlich identisch sind und die eine oder andere Bezeichnung nur gewählt ist, je nachdem der damit gemeinte Effekt die bereits vorhandene Ladung des Auffangegefäßes vergrößert oder verkleinert.

3. Ohne Tropfen und mit
Strahlen.

(Erste Ruhelage der Nadel.)

(Nullpunkt 500,0)

567,0

4. Mit 200 Tropfen und mit
Strahlen.

(Zweite Ruhelage der Nadel.)

(Nullpunkt 500)

569,5

5. Zerstreuungskurve.

Zeit in $\frac{1}{4}$ Min.	Ausschlag
0	650
1	584,0
2	570,5
3	568,0
4	567,0
5	567,0

Die graphische Auswertung gibt
einen Zerstreuungseffekt von
12,6 Skt. pro Minute (im Punkte
569,5), welcher entgegengesetzt
gleich ist dem „Aufladungseffekt“.

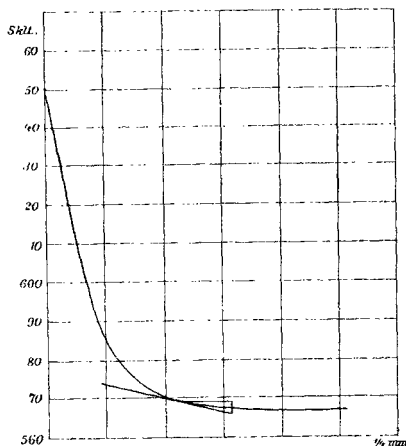


Fig. 2.

Die Adsorption würde also bei diesem Versuch eine Aufladung von $12,6 - 4,1 = 8,5$ Skalenteilen pro Minute hervorrufen.

Als Mittelwert aus zahlreichen Versuchen ergab sich hierfür der Wert von 12,5, das entspricht einer Elektrizitätsmenge von $7,3 \cdot 10^{-3}$ st. Einh. oder von etwa $2 \cdot 10^7$ Ionenladungen, welche also die 200 Tropfen adsorbiert hatten.

Die Resultate der einzelnen Versuche weichen nicht unerheblich voneinander ab. Bedenkt man, daß eine geringe

Änderung der Potentialdifferenz $A-M$ die Zerstreuungskurve schon bedeutend deformieren wird, daß ferner die Intensität der Röntgenstrahlen bei den einzelnen Versuchen nicht unerheblich schwankte, so kann obiges Resultat nicht mehr als die Größenordnung des zu messenden Effektes angeben.

Die Messung der Ionendichte (aus dem Sättigungsstrom und der Beziehung für den stationären Zustand

$$n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \quad (\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6})$$

ergab im Mittel $1,3 \cdot 10^6$ Ionen pro ccm. Die 200 Tropfen adsorbierten eine Elektrizitätsmenge entsprechend der Ladung von $2 \cdot 10^7$ negativen Ionen. Dies wird vielleicht anschaulicher durch die folgende Angabe: Da die Fallhöhe der Tropfen 90 cm betrug, so wurden von den, in einer Säule vom Querschnitt der Tropfen und von der angegebenen Höhe vorhandenen Ionen, von jedem Tropfen also etwa 0,5 Proz. adsorbiert.

Ich möchte hier jedoch kurz auf folgendes hinweisen. Man wird im Falle der ständig wirkenden Strahlung nicht direkt die in der Luft vorhandene Ionendichte, wie sie sich aus der Messung des Sättigungsstromes im Plattenkondensator ergibt, in Verbindung bringen dürfen mit der adsorbierten Ionenmenge, sondern es werden bei diesen Versuchen vermutlich weit höhere Ionendichten in Betracht kommen. Der Vorgang der Ionenadsorption spielt sich, wie dies Ebert l. c. ausführlich zeigt, in einer Luftschicht ab, welche der adsorbierenden Oberfläche unmittelbar anliegt. Wird nun ein herabfallender Wassertropfen von den Röntgenstrahlen getroffen, so ist die Ionisation in seiner unmittelbaren Umgebung infolge der von ihm ausgehenden Sekundärstrahlen jedenfalls viel stärker als die von den primären Strahlen allein im freien Luftraum hervorgebrachte Ionisation, zumal da ja die Sekundärstrahlen bekanntlich besonders stark absorbiert werden und ionisieren. Es würde sich wohl lohnen, diese Verhältnisse an Tropfen aus verschiedenen Flüssigkeiten genauer zu untersuchen.

Der Effekt mußte sich vergrößern lassen durch Vermehrung der herabfallenden Tropfen. Ich ließ deshalb nun

nicht mehr einzelne Tropfen aus der Tropfspitze austreten, sondern einen zusammenhängenden Strahl (40 ccm pro Minute), der sich einige Zentimeter unterhalb der Abtropfstelle in einzelne Tropfen auflöste. Das herabfallende Wasser wurde aufgefangen von dem oben erwähnten größeren Blechzylinder. Auf diese Weise wurden Werte für die adsorbierte Elektrizitätsmenge erhalten, die etwa dreimal so groß waren als die oben angegebenen; doch können die beiden Resultate nicht weiter miteinander verglichen werden, da hier über die Größe und Anzahl der Tropfen nichts bekannt ist.

2. *Versuche nach Abstellung der Strahlungsquelle.* Eine zweite Reihe von Versuchen war denen von Schmauss nachgebildet. Da die zu erwartende Wirkung jedenfalls sehr klein war, arbeitete ich von vornherein in der eben angegebenen Weise mit einem kontinuierlichen Wasserstrahl. Die Luft wurde längere Zeit ionisiert, bis sich ein stationärer Zustand eingestellt haben konnte. Die Beobachtung wurde erst 5 oder 15 Sek. nach Abstellung der Röntgenröhre begonnen, indem vom Beobachtungsplatz aus die Erdung des Quadrantelektrometers gelöst wurde.

Betrachten wir zunächst die Erscheinung, welche eintritt ohne Tätigkeit des Wasserstrahles. Der nun allein wirkende Aufladungseffekt verursachte eine Aufladung des Auffanggefäßes; doch nimmt dieser Effekt rasch ab, um in den bei natürlicher Ionisation, d. h. ohne vorangehende Bestrahlung, überzugehen. Die den aufladenden Ionenstrom tragenden Ionen werden nämlich soweit sie von der künstlichen Ionisation herrühren, sehr bald erschöpft sein; auf einen steilen Anstieg der Aufladung folgt ein stetig andauernder sehr schwacher, welcher der natürlichen Ionisation zuzuschreiben ist, und der andauert, bis die Potentialdifferenz $A - M$ ausgeglichen ist, was etwa 30 Min. in Anspruch nimmt. Die Aufladungskurve, wie sie in einem der Versuche erhalten wurde, ist dargestellt durch die Kurve Z (Fig. 3). Der Vorgang ist hier ein ganz anderer als bei dauernd in Tätigkeit bleibender Strahlungsquelle; in diesem Falle würden wir für die Aufladung eine ganz ähnliche Kurve erhalten. Während aber die Ursache für die Abflachung der „Aufladungskurve“ dabei die Abnahme der treibenden Potentialdifferenz zwischen A und M

ist, kommt in dem vorliegenden Falle (d. h. bei einem Versuch nach Abstellung der Röntgenröhre) nun in erster Linie die Erschöpfung des zur Verfügung stehenden Ionenvorrates als solche in Betracht; und zwar wird die Ionendichte schnell vermindert einmal durch die Wegführung der Ionen im aufladenden Ionenstrom und dann durch die stets wirkende Rekombination der Ionen.

Dabei ist jedoch nun folgendes zu beachten: Der erste steile Anstieg wird auf das Elektrometer ähnlich wie ein plötz-

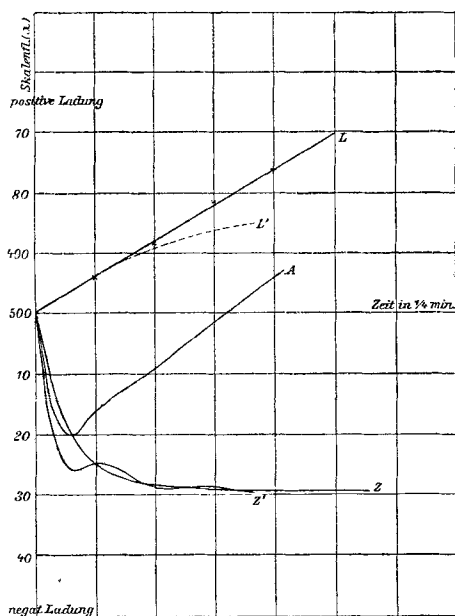


Fig. 3.

licher Stromstoß wirken; die aufeinanderfolgenden Nadelstellungen werden also nicht den Punkten der ausgeglichenen Kurve Z entsprechen, sondern einer oszillierenden Kurve Z' , die mit stetig abnehmender Amplitude um jene herumpendelt. (Diese Kurve Z' wurde erhalten durch Beobachtung von 5 zu 5 Sek.)

Beobachten wir nun ganz ebenso, wenn der Wasserstrahl in Tätigkeit ist, und wenn vorher nicht künstlich ionisiert wurde, so erhalten wir eine Kombination vom Lenard- und

Water-Droppereffekt. Die diesen beiden Effekten entsprechende Kurve ist die Kurve L . Wir haben also somit für sich allein Kenntnis von der Bewegung der Nadel: 1. infolge des Aufladungseffektes — Kurve Z' (Versuch ohne Wasserstrahl, bei vorheriger Ionisation) und 2. infolge des Lenard- und des Water-Droppereffektes — Kurve L (Versuch mit Wasserstrahl, ohne vorherige Ionisation). Zu dem letzteren ist noch zu bemerken, daß der auch in diesem Falle vorhandene Aufladungseffekt infolge der natürlichen Ionisation vollkommen vernachlässigt werden durfte gegenüber der Wirkung der beiden anderen Effekte.

Wenn wir nun endlich eine Beobachtung anstellen, während der Wasserstrahl in Tätigkeit ist, *und* wenn vorher bestrahlt worden war, so werden wir eine Kombination der drei störenden Nebeneffekte und des gesuchten Adsorptionseffektes erhalten. Ist der letztere unmerklich klein, so erhalten wir nur eine Kombination der drei Nebeneffekte. Die Bewegung der Elektrometernadel wird dann durch eine Kurve A beschrieben, die sich direkt durch Kombination der beiden Kurven Z' und L erhalten lassen muß.

Nun kann man, um festzustellen, ob die beobachtete Kurve A allein durch das Zusammenwirken der den beiden Kurven Z' und L entsprechenden drei Effekte entsteht, oder ob dazu noch der Adsorptionseffekt tritt, nicht einfach die Kurven Z' und L superponieren und die so erhaltene Kurve mit A vergleichen. Die Bewegung der Elektrometernadel unter dem Einfluß einer mit der Zeit *variablen* Kraft $f(t)$ ist gegeben durch die Gleichung

$$(1) \quad \frac{d^2 \alpha_1}{dt^2} + m_1 \frac{d \alpha_1}{dt} + m_2 \alpha_1 + m_3 f(t) = 0.$$

Das Integral dieser Gleichung ist, wenn δ und T in bekannter Weise Dämpfung und Schwingungsdauer charakterisieren und $\lambda_1 \lambda_2$ Wurzeln der Gleichung $\lambda^2 + m_1 \lambda + m_2 = 0$ sind, das folgende:

$$(2) \quad \left\{ \begin{aligned} \alpha_1 = & \frac{m_3}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^t e^{-\delta(t-\xi)} \sin \frac{\pi}{T}(t-\xi) f(\xi) d\xi \\ & + \left(\frac{d \alpha_1}{dt} \right)_{t=0} \cdot \frac{T}{\pi} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \frac{\pi}{T} t. \end{aligned} \right.$$

Wir wollen nun annehmen, die Kraft $f(t)$ sei die bewegende Kraft etwa des Aufladungseffektes. Dann stellt uns α_1 direkt die Bewegung dar, welche durch die oben erhaltene Kurve Z' beschrieben ist. Ist ebenso $\varphi(t)$ die Kraft der beiden anderen Effekte, so ist die Kurve L durch einen ganz analogen Ausdruck α_2 gegeben, in dem nur an Stelle von $f(\xi)$ im ersten Integral natürlich $\varphi(\xi)$ steht. Wirken nun die drei Effekte zusammen, so entsteht eine Kurve A und man sieht ohne weiteres, daß das zugehörige α nur dann gleich $(\alpha_1 + \alpha_2)$ ist, wenn gilt

$$(3) \quad \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{t=0} = \left(\frac{d\alpha_1}{dt}\right)_{t=0} + \left(\frac{d\alpha_2}{dt}\right)_{t=0}.$$

Nur dann also dürfen wir die beiden Kurven Z' und L geometrisch addieren und können erwarten, daß die so erhaltene Kurve uns die Bewegung der Elektrometernadel gibt, wenn die drei Nebeneffekte zugleich auf sie wirken. Es ist nun sehr schwer, die Bedingung (3) aus den Kurven genau nachzuprüfen; daß sie nicht strenge erfüllt ist, zeigt schon der Verlauf der tatsächlich beobachteten Kurve A . Eine Messung von $(d\alpha/dt)_{t=0}$ und eine punktweise Vergleichung der beobachteten und der aus Z' und L berechneten Kurve ist jedenfalls recht kompliziert, da sie die Kenntnis der Konstanten in Gleichung (1) voraussetzt. Diese kleine Schwierigkeit kann man nun umgehen, wenn man den Aufladungseffekt so verändert, daß für die ihm entsprechende Kurve Z' $(d\alpha_1/dt)_{t=0} = 0$. Es gelang mir dies auf folgende Weise. In geringer Entfernung von der inneren Wand des Kastens M wurde eine Metallplatte isoliert aufgestellt, die durch ein Element im regulierbaren Nebenschluß auf positive Potentiale zwischen Null und 1 Volt aufgeladen werden konnte. Durch geeignete Wahl dieses Potentials konnte ich nun erreichen, daß $(d\alpha/dt)_0$ für den Zerstreueffekt in der Tat Null wurde. Es fließt dann von der Metallplatte nach einem Teil von A ein positiver Ionenstrom, der den nach den übrigen Teilen von A infolge der Potentialdifferenz $A-M$ fließenden negativen gerade aufwiegt. Diese Kompensation ist natürlich nur vollständig für $\alpha = 0$, da der Zerstreueffekt von neuem auftritt, sobald das Auffangegefäß eine von Null verschiedene Ladung hat. Die Kapazität von A wurde durch die Metallplatte nur wenig

geändert. Wenn man nun den Wasserstrahl in Tätigkeit setzt, ohne vorher bestrahlt zu haben, so erhält man eine Gerade L . Stellt man dieselbe Beobachtung an, wenn vorher bestrahlt wurde, so erhält man eine Kurve L' mit *genau derselben Tangentenrichtung im Nullpunkt*. Die adsorbierte Elektrizitätsmenge ist also jedenfalls unterhalb der Empfindlichkeitsgrenze dieser Anordnung gelegen, was etwa 10^{-4} st. Einh. entspricht. Dabei ist außerdem zu beobachten, daß bei diesen Versuchen, wie anfangs angegeben, ein kontinuierlicher Wasserstrahl, also jedenfalls eine verhältnismäßig recht große adsorbierende Oberfläche benutzt wurde. Die allerersten herabfallenden Tropfen werden natürlich negative Elektrizität adsorbieren, allerdings wegen der geringeren Ionendichte weniger als im Falle der ständig wirkenden Röntgenstrahlen. Die folgenden Tropfen jedoch finden bereits, wie der Versuch zeigt, in ihrer Falllinie ionenarme Luft vor, d. h. es findet tatsächlich eine Ausionisierung statt.

V. Die Versuche von Schmauss.

Da ich, wie eben ausführlich gezeigt wurde, bei Beobachtung der nötigen Vorsichtsmaßregeln zu Resultaten von ganz anderer Größenordnung gelangt bin wie Schmauss, möchte ich noch versuchen, zu erklären, wie Schmauss zu seinen Resultaten möglicherweise hat gelangen können. Die Größenverhältnisse des von Schmauss benutzten Apparates gehen aus der seiner Arbeit beigegebenen Figur hervor. Die Kapazität des Auffangegefäßes und des Elektrometers samt den Zuleitungen dürfen wir mindestens zu 100 cm annehmen. Schmauss findet nun im Maximum eine Aufladung von etwas mehr als 1 Volt, die in einer Minute durch den Wasserstrahl bewirkt wurde und die Schmauss durch Adsorption negativer Ionen zu erklären sucht. Eine einfache Überschlagsrechnung zeigt nun, daß dies Resultat viel zu groß sein muß. Nehmen wir intensive Röntgenstrahlung an, so waren nach Eintritt eines stationären Zustandes etwa 10^6 Ionen in ccm vorhanden. Schmauss beginnt seinen Versuch nach seiner Angabe mindestens 30 Sek. nach Abstellung der Röntgenröhre; er hatte dann infolge der in der Zwischenzeit wirkenden Rekombination noch höchstens

3.10⁴ Ionen pro ccm. Nehmen wir nun z. B. an, *alle* negativen Ionen, die in einem Zylinder von 1 qdm Grundfläche und von 60 cm Höhe (= größte Fallhöhe bei Schmauss) vorhanden waren, würden in einer Minute in das Auffangegefäß hineintransportiert werden, so hätten sie dieses auf etwa 0,2 Volt geladen. Es ist dies ein viel kleinerer Wert als der, welchen Schmauss für die Adsorptionswirkung angibt, dessen Resultat also offenbar viel zu groß.

Da ich nun bei meinen oben an letzter Stelle beschriebenen Versuchen ganz ähnliche Kurven (Kurve *A*) erhalten habe, wie die von Schmauss angegebenen, so vermute ich, daß sich diese eben durch den Aufladungseffekt erklären lassen; es ist dies auch der einzige der drei störenden Effekte, welcher in der zitierten Arbeit nicht erwähnt ist. Auf diese Weise lassen sich wohl auch alle anderen Versuche, die Schmauss zugunsten seiner Auffassung anführt, erklären. Stellen wir z. B. den Versuch in Kohlensäure an Stelle in Luft an, so wird wegen der nur etwa $\frac{1}{2}$ mal so großen Beweglichkeit der Ionen der Aufladungseffekt auch nur etwa halb so stark sein; dies wird also zur Folge haben, daß die im ganzen in einer Minute dem Auffangegefäß zugeführte Ladung in Kohlensäure bedeutend kleiner ist als in Luft. Ich habe einige orientierende Versuche in dieser Richtung angestellt und das eben Gesagte bestätigt gefunden. Auch die in Abschnitt II, 1, 2 der Schmauss'schen Arbeit beschriebenen Versuche kann man, wie ich glaube, ungezwungen auf ähnliche Weise erklären. Ganz dasselbe gilt für die unter 3 und 4 angegebenen Resultate; so wird z. B. der Aufladungseffekt durchaus nicht davon unabhängig sein, in welcher Lage innerhalb des schützenden großen Blechgefäßes das Auffangegefäß angebracht ist; ebenso wird sich der Water-Droppereffekt bei nicht isolierter Ausflußöffnung (wie dies bei Schmauss der Fall war) mit der pro Minute abfließenden Wassermenge ändern. Da ich bei diesen Betrachtungen jedoch auf bloße Vermutungen angewiesen bin, möchte ich dies nicht weiter ausführen, sondern am Schlusse nur konstatieren, daß Schmauss sicher nicht den reinen Adsorptionseffekt beobachtet hat, sondern eine Überlagerung dieses und der drei störenden Nebeneffekte.

Zusammenfassung.

Die Resultate der vorliegenden Arbeit sind also kurz folgende:

1. Wenn Wassertropfen durch ionisierte Luft fallen, so nehmen sie aus dieser geringe negative Ladung auf, jedoch in meßbarer Größe nur dann, wenn die ionisierende Röntgenstrahlung während des Herabfallens des Wassers fort dauert. Von einem einzelnen Tropfen werden etwa 0,5 Proz. der in der Falllinie vorhandenen negativen Ionen absorbiert.

2. Stellt man die ionisierende Röntgenröhre einige Zeit vor Beginn der Beobachtung ab, so läßt sich eine solche Adsorption nicht mehr nachweisen und zwar einmal wegen der geringen nun im Fallraum vorhandenen Ionenmenge und dann wegen der durch die ersten Tropfen erfolgenden Ausionisierung.

3. Es ist wahrscheinlich, daß in der an die adsorbierende Oberfläche unmittelbar angrenzenden Luftschicht, welche für die Adsorption allein in Betracht kommt, wegen der sekundären Röntgenstrahlen mit größeren Ionendichten zu rechnen ist als im freien Luftraum.

4. Die Resultate von Schmauss sind sicher viel, und zwar etwa 1000mal, zu groß. Sie lassen sich mit großer Wahrscheinlichkeit erklären durch die Nichtbeachtung der störenden Nebeneffekte.

Zum Schluß möchte ich auch hier Hrn. Prof. Ebert meinen besten Dank dafür aussprechen, daß er mir die Mittel seines Institutes in liebenswürdigster Weise zur Verfügung stellte und mich im Verlaufe der Arbeit stets durch seinen Rat unterstützte.

München, Physik. Inst. d. Techn. Hochsch., Dez. 1909.

(Eingegangen 23. Dezember 1909.)
