

Sonderabdruck
aus
Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik
Verlag von S. Hirzel in Leipzig

P. GSCHWEND

BEOBACHTUNGEN ÜBER DIE ELEKTRISCHEN
LADUNGEN EINZELNER REGENTROPFEN UND
SCHNEEFLOCKEN

Aus: Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik. XVII. Band. Heft 1.

Beobachtungen über die elektrischen Ladungen einzelner Regentropfen und Schneeflocken.

Von Peter Gschwend.

I. Einleitung und Versuchsanordnung.

Die Elektrizität der Niederschläge ist noch keineswegs befriedigend erklärt, die Ladungen einzelner Regentropfen und Schneeflocken sind überhaupt noch nicht gemessen worden.

Die Untersuchungen der Niederschlags Elektrizität haben begonnen mit den Arbeiten von J. Elster und H. Geitel 1888¹⁾. In einer isolierten und elektrostatisch gegen das Erdfeld geschützten Schale haben die-

1) Betreffs der Literatur verweise ich auf die zusammenfassenden Arbeiten: H. Benndorf, Sitzungsber. d. Münchner Akad. Jahrg. 1912, 402—429; H. Geitel, Phys. Zeitschr. 17, 455—464, 1916.

selben die Niederschläge aufgefangen und die Aufladung der Schale von Zeit zu Zeit mit einem Elektrometer gemessen.

Die Ausschläge wurden von H. Gerdien (Göttingen 1902) photographisch registriert, während gleichzeitig durch einen großen Widerstand (bis 10^{12} Ohm) die Schale fortwährend einen Teil ihrer Ladungen an die Erde abgab.

Gerdien beobachtete, besonders bei Gewittern, rasche Zeichenwechsel. Eine Erklärung dafür wollte er nicht geben, weil schon geringe Isolationsfehler, wie Benndorf¹⁾ gezeigt hat, die Resultate stark verändern mußten.

Die von K. Kähler, H. Benndorf, G. C. Simpson und F. Schindelbauer angewandte Registriermethode ist noch weniger geeignet, über rasche Zeichenwechsel Aufschluß zu geben, als die Methode von Gerdien. Die Anordnung dieser Forscher hat nämlich den wesentlichen Umstand gemeinsam, daß das Potential der Schale erst nach Verlauf einer längeren Zeit (nach 2 Min.; bei Benndorf nach 10 Min.) mechanisch registriert wird. Es ist also unmöglich, Zeichenwechsel innerhalb dieses Intervalles zu beobachten.

Solche Zeichenwechsel kommen aber vor, wie M. Baldit durch Beobachtungen im Intervalle $\frac{1}{4}$ Min. zeigen konnte.

Es seien ferner erwähnt die Arbeiten von E. Weiss, K. W. F. Kohlrausch und F. Herath. Letzterer registrierte den Strom über 25 m^2 Auffangfläche mit dem Galvanometer. Abgesehen davon, daß hier Influenzwirkungen von seiten des Erdfeldes sehr störend sein können, müssen die Angaben über die Stromstärke zu klein ausfallen, wenn positiv und negativ geladene Teilchen nebeneinander oder gemischt vorkommen. Dieser letzte Einwurf betrifft jede schon besprochene Methode in dem Maße, als die Auffangfläche größer oder kleiner ist.

Schon Benndorf²⁾ bezeichnete (1912) die Messung der Ladung einzelner Tropfen und die Untersuchung, ob irgendeine Beziehung zwischen Tropfengröße und Ladung bestehe, ob gewisse Ladungen häufiger vorkommen usw., als möglich und wünschenswert.

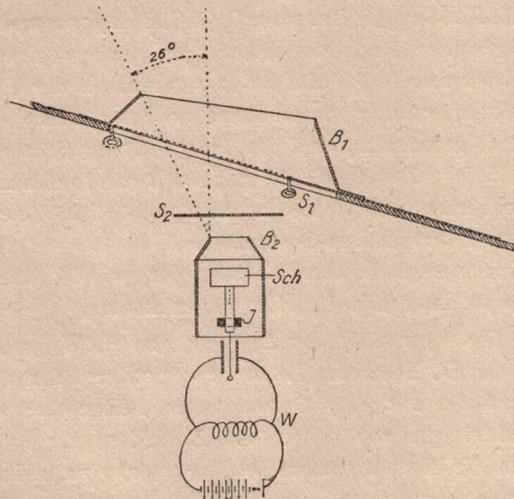
Auf Anregung von Prof. A. Gockel habe ich Untersuchungen in dieser Richtung im Universitätsinstitut für kosmische Physik in Freiburg (Schweiz) unternommen. Das Ziel war, die Ladungen einzelner Niederschlagsteilchen zu bestimmen und gleichzeitig die Struktur des Regens zu untersuchen.

1) H. Benndorf, l. c. S. 416.

2) H. Benndorf, l. c. S. 427.

Zu diesem Zweck wurde die Wiesnersche Methode zur Bestimmung der Tropfengröße direkt mit der Messung der elektrischen Ladungen verbunden. Ein mit Eosin bestäubtes Stück Filtrierpapier der von Wiesner¹⁾ angegebenen Art wurde auf den Boden einer metallischen Auffangschale (12 cm² Fläche) gelegt und letztere mit einem empfindlichen Elektrometer verbunden.

Die Schale wurde mit Hilfe eines mit der Hand beweglichen Deckels für kurze Zeit (Momentexposition) unter dem durchlochten Dach einer eigens hierfür konstruierten Hütte dem Regen ausgesetzt.



Oft gelang es dann, einen einzelnen Tropfen oder eine einzelne Flocke mit meßbarer Ladung aufzufangen.

Bei einer zweiten Art von Messungen (Dauermessungen) blieb die Eintrittsblende 15 bis 120 Sek. lang geöffnet und die rasch sich folgenden Ausschläge wurden fortlaufend notiert.

Endlich wurden die Dauermessungen noch so abgeändert, daß man auf die Ausmessung der Tropfenflocke verzichtete und jetzt während 5 bis 10 Min. die Ausschläge des Instrumentes fortlaufend notierte.

Die Beobachtungen wurden auf der Terrasse des Physikalischen Instituts in Freiburg (Schweiz) angestellt. Der Platz war gegen Nord- und Südwinde durch Gebäude geschützt.

1) Siehe Aug. Becker, Meteorol. Zeitschr. 24, 247, 1907.

Fig. 1 zeigt ein Stück des Daches der Beobachtungshütte und darin die obere Blende (B_1) von 18 cm Durchmesser, die geöffnet und geschlossen wird mit dem Schieber S_1 . Ferner sieht man die untere Blende B_2 (Durchmesser 3,85 cm), die auf das Gehäuse des Instrumentes aufgesetzt ist. Statt dieser Blende wurde bei vielen Messungen auch eine solche von 2,78 cm Durchmesser verwendet. Die untere Blende wird geöffnet und geschlossen durch den mit der Hand zu bewegendem Deckel S_2 . Die Schale Sch ist auf den Zuleitungsstift aufgesetzt. Des weitern ist die Schaltung der Hilfsladung zu sehen. Eine Batterie von 60 Akkumulatorenzellen ist über einen großen Widerstand ($W=200\,000$ Ohm) geschlossen. An den Enden des Widerstandes liegt die Abzweigung zum Elektrometer.

Als solches diente vom 23. Jan. 1919 bis 26. Juni 1919 ein Elster-Geitelsches¹⁾ Fadenelektrometer, nachher bis zum 9. Dezember 1919 ein Lutzsches²⁾ Saitenelektrometer.

Zur Sicherung der Isolation durch den Bernstein [s. Fig. 1: I] wurde der obere Teil des Gehäuses ein wenig von rückwärts mit einer Metallfadenlampe bestrahlt; später wurde eine elektrische Heizspirale eingebaut.

Bei einer Empfindlichkeit von 25 Skalenteilen pro Volt war die Eichkurve beim Elster-Geitelschen Instrument noch eine Gerade. Weiter konnte das Instrument beansprucht werden bis höchstens 50 Skalenteilen pro Volt. Die gesamte Kapazität (Elektrometer + Auffangschale) betrug 8 cm.

Die mittlere Empfindlichkeit, bei der das Saiteninstrument von Lutz gebraucht wurde, war 30 Skt. pro Volt. Bei der größten Empfindlichkeit konnte noch eine Ladung von $0,02 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. gemessen werden. Hier war die Kapazität des isolierten Systems 9 cm. Die Empfindlichkeit der Instrumente wurde ungefähr jede halbe Stunde durch Anlegen eines Normalelementes kontrolliert.

Bei der Untersuchung der Fehlerquellen³⁾ findet man, daß Aufladungen der Schale bei einer Änderung des Erdfeldes und durch vertikalen Leitungsstrom, in Folge der starken Abschwächung des Feldes über der Schale keinen nennenswerten Einfluß haben.

Die durch abgespritzte Tropfen hervorgerufenen Fehler wurden besonders genau untersucht. Die obere Blende wurde groß gegen die

1) J. Elster u. H. Geitel, Phys. Zeitschr. 10, 664, 1909.

2) C. W. Lutz, Phys. Zeitschr. 9, 100, 1908.

3) Vgl. H. Benndorf, l. c. S. 413—418.

untere gemacht und der Rand derselben messerscharf zugeschliffen. Von dieser Blende konnten nur bei starkem Wind Tropfen in das Gefäß abspringen. Wenn dies eintrat, mußten die Messungen entweder ganz unterbleiben oder auf die Zeit der Windpausen beschränkt werden. An der unteren Blende aber entladen sich viele Tropfen, wodurch der pro cm^2 berechnete Strom zu klein ausfällt. Bei Verwendung der kleinern untern Blende ($r=13,9$ mm) und bei einem mittleren Tropfendurchmesser ($d=1,34$ mm), wie er für die Gewitter gefunden wurde, macht diese entladende Wirkung 22 Proz. aus und berechnet sich aus der Formel:

$$\frac{r^2 - (r-d)^2}{(r-d)^2} 100 \text{ Proz.}$$

Dieser Fehler ist in Tabelle 1 in Rechnung gebracht worden.

Die Influenzwirkung des Erdfeldes auf diese anstoßenden Tropfen wurde in einem künstlich hergestelltem Felde untersucht. Tropfen von 1,17 mm Durchmesser nahmen bei einem Felde entsprechend 8800 V/m im Maximum eine Ladung von $0,9 \cdot 10^{-3}$ E.S.E., im Mittel eine solche von $0,3 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. an. Da nun dieser Fehler ungefähr proportional der Feldstärke ist, so konnte bei geringen Feldstärken (Landregen) noch mit empfindlicher, bei Gewittern aber nur mit etwas unempfindlicher Einstellung des Instruments gearbeitet werden. Diese Vorsichtsmaßregel war aber auch schon aus anderen Gründen geboten, nämlich durch die Ladungen der Tropfen oder Flocken, die bei Böen und Gewittern so groß waren, daß bei empfindlicher Einstellung der Faden des Instruments leicht aus dem Gesichtsfelde verschwand.

Ein störender Lenard-Effekt¹⁾ wurde durch das eingelegte Papier und durch den Rand der Schale beseitigt, wie Probeversuche zeigten.

Neben der Messung der Tropfealadung und Tropfengröße ging noch parallel eine Registrierung des Potentialgefälles mit einem Benndorfschen²⁾ Registrator mit Minuten und Stundenkontakt und bei vielen Messungen auch eine Registrierung der Regenintensität mit einem nach Art des Gallenkampschen³⁾ gebauten Apparat.

Die Messungen verlaufen folgendermaßen: Wenn die Registratoren eingestellt sind, und die Uhr des Beobachters mit den Uhren dieser

1) P. Lenard, Wied. Ann. 46, 584, 1892; Ders., Ann. d. Phys. 47, 463, 1915.

2) H. Benndorf, Phys. Zeitschr. 7, 98, 1906.

3) W. Gallenkamp, Meteorol. Zeitschr. 22, 1, 1905; Ders., Zeitschr. f. Instrumentenk. 28, 33, 1908.

Apparate in Übereinstimmung gebracht worden ist, begibt sich der Beobachter in die Beobachtungshütte. Man legt ein zubereitetes Filtrierpapier in die Schale, öffnet die obere Blende und dann für kurze oder längere Zeit auch die unter (S_2) und beobachtet durch das Mikroskop die Ausschläge des Elektrometerfadens. Bei Dauerbeobachtungen wurden die Angaben des Instruments notiert, ohne daß sich das Auge vom Mikroskop wandte. Nach beendeter Messung schließt man die untere und dann die obere Blende und nimmt das Papier aus der Schale. Letzteres wird bei Moment- und kurzen Dauerbeobachtungen numeriert und später ausgemessen. Im Beobachtungsheft notiert man den Ausschlag und die meteorologischen Vermerke.

II. Resultate.

1. Momentbeobachtungen. Momentbeobachtungen mit nur einem nach Ladung und Größe gut definierten Tropfen sind nicht leicht anzustellen, denn sowohl bei starker Intensität des Regens wie bei schwach geladenem Regen werden leicht mehrere Niederschlagsteilchen zugleich aufgefangen. Bei Landregen und ähnlichem Regen wurden 61, bei Gewittern und Böen 64 Tropfen und bei Schnee und Graupelfällen 34 Niederschlagsteilchen einzeln beobachtet. Zur Lösung mancher Fragen können aber auch jene Messungen herangezogen werden, bei denen mehr als ein Niederschlagsteilchen gleichzeitig aufgefangen wurde.

Vorzeichen der Ladung, Ladungsgröße und Spannung einzelner Tropfen.

Eine Gesetzmäßigkeit etwa in dem Sinne, daß die Ladungen aller großen Tropfen (oder überhaupt Niederschlagsteilchen) bei den verschiedensten Niederschlägen ein bestimmtes Vorzeichen haben und die aller kleinen das entgegengesetzte, läßt sich nicht finden.

Große Tropfen haben durchweg große Ladungen. Bei Tropfen zwischen 10 und 20 mg Gewicht wurden Ladungen zwischen 5 und $100 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. pro Tropfen beobachtet. Größere Tropfen wurden einzeln nie gemessen, ebenso nicht wirklich große Schneeflocken.

Hauptsächlich positiv geladen sind die kleinen Tropfen bei Landregen, besonders wenn derselbe aus Nebel und tiefer liegenden Wolken ruhig niederfällt. Bei ruhigen Schneefällen sind die kleinen Teilchen hauptsächlich negativ geladen und so auch bei einem kurz vor Schnee-

fall eintretenden Regen, der wahrscheinlich bis kurz vor Ankunft an der Beobachtungsstelle als Schnee existierte.

Deutlich zeigen sich Unterschiede zwischen ruhigen und böigen Vorgängen, indem bei letzteren sowohl die Ladungen der einzelnen Niederschlagsteilchen stärker, als auch die Durchmischung der Vorzeichen ausgeprägter war als bei Landregen und ruhigen Schneefällen.

Im besonderen findet man

a) Landregen: Ein deutliches Vorherrschen des positiven Vorzeichens (80 Proz.) findet sich nur bei den kleinen Tropfen (0—0,1 mg Gewicht). Die großen Tropfen sind gegenüber den kleinen häufiger negativ geladen.

Das Ladungsvorzeichen der Tropfen ist öfter dem Vorzeichen des gleichzeitigen Potentialgefälles (Luft—Erde) entgegengesetzt, als ihm gleich (Verhältnis 24:13); aber es zeigt sich hierin keine Beziehung zur Tropfengröße.

Die Spannungen der Tropfen sind unter sich verschieden und schwanken gewöhnlich zwischen 0,5 und 10 Volt. Auffallend ist, daß kleine Tropfen schon bei Landregen bisweilen größere Ladungen haben, als ihnen zukommen würden, wenn die Tropfen ihre Ladung und Wassermenge allein durch Zusammenfließen nur gleichartig geladener ($e = 4,7 \cdot 10^{-10}$ E.S.E.) Nebelteilchen (mittlere Größe $r = 3 \cdot 10^{-4}$ cm) erhalten hätten.

b) Gewitter und Böen: Das negative Vorzeichen tritt bei Gewittern und Böen (?) häufiger auf als bei Landregen, überwiegt sogar ein wenig gegenüber dem positiven Vorzeichen. Aus 5 Beobachtungsreihen ergeben sich 36 negative und 28 positive Tropfen. Wieder sind die großen Tropfen häufiger negativ geladen als die kleinen.

In bezug auf das Potentialgefälle der Luft tritt spiegelbildliches Verhältnis ungefähr ebensooft auf, als gleichgerichtetes (33:31) und eine Beziehung zur Tropfengröße ist hierbei wieder nicht zu finden.

Die Potentiale der Tropfen schwanken innerhalb größerer Grenzen als bei den Landregen und liegen gewöhnlich zwischen 0,5 und 100 Volt. Ferner zeigt sich bei Gewittern, daß die größeren Tropfen nicht nur die größeren Ladungen, sondern auch die größeren Spannungen besitzen,

daß aber der Wert $\frac{\text{Ladung}}{\text{Gewicht}}$ mit zunehmender Tropfengröße abnimmt.

Dasselbe beobachtet man auch bei Landregen.

c) Schnee- und Graupelfälle: In ruhigen Schneefällen sind die größeren Flocken mehr positiv, die kleineren mehr negativ geladen. Das Vorzeichen der Ladung ist häufiger dem des Potentialgefälles ent-

Tabelle I.

1	2	3			4			5			6			7
		Mittleres Gewicht in eines Tropfens (od. Flocke)			Mittl. Ladung eines Tropfens (od. Flocke) in 10 ⁻³ E.S.E.			Spannung d. Tropfen mittl. Größe in Volt			Ladung/mg in 10 ⁻³ E.S.E.			
Art des Niederschlags	Zahl d. gemein- senen Tropfen	a ⁺	b ⁻	c	a ⁺	b ⁻	c	a ⁺	b ⁻	c	a ⁺	b ⁻	c	
Landregen . .	483	0,39	0,63	0,42	0,24	0,53	0,25	1,6	2,9	1,6	0,62	0,84	0,60	2,12
Böenregen . .	43	0,93	0,85	0,75	1,75	5,43	2,25	8,6	27,6	11,9	1,9	6,4	3,0	0,55
Gewitter . . .	88	1,21	1,46	1,27	8,11	5,88	6,24	36,8	26,0	27,8	6,7	4,0	4,9	1,51
Ruh. Schneefälle	224	0,24	0,18	0,20	0,09	0,06	0,07	—	—	—	0,38	0,33	0,35	1,29
Böig. Schneefälle	152	0,14	0,16	0,15	5,64	4,78	4,91	—	—	—	40,3	29,9	32,7	1,91
Regenfälle . .	614	0,53	0,99	0,61	1,43	3,18	1,62	8,4	15,4	9,2	2,7	3,2	2,7	1,38
Schneefälle . .	376	0,20	0,17	0,17	2,33	1,38	1,66	—	—	—	11,6	8,1	9,8	1,89

a bezieht sich auf das positive Ladungsvorzeichen.

b bezieht sich auf das negative Ladungsvorzeichen.

c zeigt die Verhältnisse unabhängig vom Vorzeichen der Ladung.

gegengesetzt, als ihm gleich, ohne daß hierin eine deutliche Regel zu finden ist.

Betrachtet man alle Momentexpositionen, auch jene, bei denen sich auf dem Filtrierpapier mehr als ein Tropfen befand, so wurden insgesamt $+1821$ und $-1174 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. gemessen, woraus sich das Verhältnis $\frac{E+}{E-} = 1,55$ ergibt, also ein deutlicher positiver Gesamtüberschuß.

Aus allen Momentexpositionen ist die Tabelle I entstanden.

Zu bemerken ist, daß die Anzahl der Tropfen und noch mehr die Anzahl der Flocken wahrscheinlich zu groß und dadurch die Werte der Kolonnen 3, 4 und 5 zu klein ausgefallen sind. Zerspritzte Tropfen und beim Auffallen zerteilte Flocken lassen sich nämlich auf dem Filtrierpapier nicht leicht als solche erkennen.

Aus der Tabelle sieht man:

a) Landregen: Auch hier zeigen sich die negativen Tropfen durchschnittlich größer als die positiven. Die Ladungen und sogar die Spannungen derselben sind ebenfalls größer. In der Rubrik „Ladung pro mg“ kommen die Verhältnisse immer noch, wenn auch bedeutend abgeschwächt, zum Ausdruck.

b) Böenregen: Die positiven Tropfen sind größer als die negativen, aber die negativen sind bedeutend stärker geladen. Bei dieser Art von Niederschlägen allein überwiegt im Verhältnis $\frac{E+}{E-}$ das negative Vorzeichen.

c) Gewitter: Die negativen Tropfen sind zwar durchschnittlich die größeren, aber die positiven sind stärker geladen. Die durchschnittliche Spannung des positiven, mittelgroßen Tropfens [36,8 Volt] kann als recht beträchtlich bezeichnet werden. Die durchschnittlichen Ladungen und Spannungen bei den Gewittern sind 10 bis 30 mal größer als bei Landregen.

d) Schneefälle: Schnee ist im Mittel mehr positiv geladen, besonders böiger. Das Verhältnis der Ladungen bei ruhigen und böigen Schneefällen ist ähnlich dem zwischen Landregen und Gewittern. In der Rubrik „Ladung pro mg“ finden sich die Höchstwerte bei den böigen Schneefällen.

Während G. C. Simpson¹⁾ in Simla mit seinen tropischen Ge-

1) G. G. Simpson, Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A, **209**, 379, 1909; Ders., Proc. Roy. Soc., Ser. A, **83**, 394, 1910.

wittern bei weitem am häufigsten Ladungen unter $1 \cdot 10^{-3}$ E.S.E./mg findet und Ladungen von mehr als $6 \cdot 10^{-3}$ E.S.E./mg nach seinen Messungen selten sind, so zeigt die obige Zusammenstellung Mittelwerte, die nur bei Landregen unter $1 \cdot 10^{-3}$ E.S.E./mg bleiben; bei Gewittern aber beträgt für die positiven Ladungen schon der Mittelwert $6 \cdot 10^{-3}$ E.S.E./mg. Drei Maximalwerte bei Gewittern sind: — 205, 130 und $122 \cdot 10^{-3}$ E.S.E./mg.

Solche und ähnliche Unterschiede sind natürlich begründet durch die Verschiedenheit der Meßmethode. Simpson muß bei der verwendeten Registrieremethode mit 2-Minuten-Kontakt und bei der großen Auffangfläche von 660 cm^2 mit stark verminderten Mittelwerten rechnen, weil fast immer mit Teilchen von dem einen Ladungsvorzeichen auch Teilchen des entgegengesetzten Vorzeichens fallen. Hierüber findet man nähere Aufschlüsse im folgenden.

2. Dauerbeobachtungen.

Mangels eines zweiten Beobachters konnten die Dauermessungen nur zwischen den Einzel- oder Momentbeobachtungen angestellt werden.

Was das Resultat dieser Dauerbeobachtungen charakterisiert, ist der häufige Zeichenwechsel auch innerhalb einer Minute. Besonders bei Gewittern ist bisweilen die Aufeinanderfolge der Zeichenwechsel so rasch, daß während mehrerer Minuten weder das positive noch das negative Zeichen vorherrscht, und daß das nach der einen Seite sich aufladende System sich immer wieder sofort nach der entgegengesetzten Seite entladet. Aber auch bei Böen- und Landregen können in gewissen Stadien dieselben Verhältnisse in bezug auf Zeichenwechsel vorkommen.

Bisweilen vermag das Auge kaum den rasch aufeinanderfolgenden Ausschlägen des Instrumentes trotz der kleinen Eintrittsblende zu folgen und noch weniger die schreibende Hand, so daß gerade bei Regen mit großen Stromstärken diese Messungen unvollständig ausgefallen sind und bei den größten Stromstärken (bei Platzregen), überhaupt nicht angestellt werden konnten.

Im Maximum wurden einmal 8 Zeichenwechsel in einer halben Minute beobachtet. (26. März böiger Regen mit Graupeln.) Zur Erklärung dieser Tatsache kann man nicht einen Messungsfehler, etwa das Anstoßen der Tropfen an der unteren Blende herbeiziehen; denn die Influenzladungen einzelner Tropfen beim Anstoßen an der unteren Blende sind klein gegenüber den gleichzeitig fallenden, wirklichen Ladungen und werden gewöhnlich nicht notiert. Gleichwohl ist zu be-

merken, daß es für genaue quantitative Messungen noch nötig sein wird, die Versuchsanordnungen, wenn möglich, günstiger zu gestalten. Qualitativ aber läßt sich in bezug auf die Struktur des Regens sicher feststellen, daß häufig eine weitgehende Mischung positiver und negativer Ladungen bei allen Niederschlagsarten vorhanden ist, und daß nur selten (bei Regen geringer Intensität) während einer Minute auf eine Fläche von 6 cm^2 Ladungen nur eines Vorzeichens fallen.

Demzufolge kann ein Registrator mit Minutenkontakt, wenn auch die Auffangfläche nicht größer als 6 cm^2 ist, nie die gesamte positive und negative Ladung messen. Er gibt nur eine algebraische Summe der beiden Vorzeichen an, von denen das eine vorherrscht. Vergleicht man die Angaben des Registrators mit Minutenkontakt und die durch fortlaufende Beobachtung gefundenen Zahlen während 5—10 Minuten, so sind die letzteren in ihrer Gesamtheit bei jeder Art des Niederschlages immer, und zwar 1,2 bis 5,4 mal größer als die ersteren.

Dieser Umstand muß auch eine Berechnung der Störungen des normalen Feldes beim Niederfallen von Regen oder Schnee aus der gemessenen Eigenladung der Niederschläge, wie eine solche R. Seeliger¹⁾ durchgeführt hat, neuerdings erschweren.

Aus sämtlichen Dauermessungen ergibt sich das Verhältnis $\frac{E+}{E-} = 1,5$, also fast genau wie bei den Einzelmessungen.

III. Laboratoriumsexperimente und Erklärungsversuche.

Die Elster-Geitelsche²⁾ Theorie, die sogenannte Influenztheorie, betrachtet die Wasserteilchen der Niederschläge, seien sie fest oder flüssig, wenn sie sich im elektrischen Felde der Erde berühren und wieder trennen, als die Grundbestandteile einer Influenzmaschine. Durch das Arbeiten dieser Maschine wird das elektrische Feld der Erde stetig gesteigert und werden große und kleine Tropfen entgegengesetzt geladen.

Durch Laboratoriumsexperimente muß nun vor allem die Möglichkeit eines elektrischen Kontakts zwischen zwei Wassertropfen, ohne daß Zusammenfließen stattfindet, bewiesen werden.

Elster und Geitel³⁾ haben einen Versuch in dieser Richtung

1) R. Seeliger, Wien. Ber. Abt. IIa, 125, 1167, 1916.

2) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. 25, 116 und 121, 1885; Dies. Phys. Zeitschr. 14, 1287, 1913.

3) J. Elster und H. Geitel, l. c. S. 129.

schon 1885 veröffentlicht. Tropfen aus einem Zerstäuber wurden auf eine isolierte, mit einem Elektrometer verbundene Wasseroberfläche gerichtet. Die Stelle, an der der Wasserstaub sich bildete, wurde elektrostatisch geschützt, die Wasseroberfläche durch einen in die Nähe gebrachten, geladenen Konduktor influenziert, und der Erfolg war, daß die Wasseroberfläche sich dem Vorzeichen nach gleich dem Konduktor auf lud; der Wasserstaub war entgegengesetzt geladen.

G. C. Simpson¹⁾ wendet ein, daß die beschriebene Aufladung, auch wenn keine Berührung der Tropfen mit der Flüssigkeit stattfand, durch die Tatsache erklärt werden kann, daß bei der Zerstäubung von Wasser in der Luft Elektrizitätsträger beiderlei Vorzeichens entstehen. Ein Teil dieser Träger wandert auch ohne die Wassertropfen, durch die Kräfte des Feldes getrieben, zur Wasseroberfläche und ladet dieselbe entgegengesetzt der Ladung des Konduktors auf.

Auf Vorschlag von Professor Gockel habe ich nun wenigstens das Auftreten eines elektrischen Kontaktes zwischen Wassertropfen und einem Wasserstrahl, ohne daß der Tropfen mit dem Strahl zusammenfließt, auf folgende Weise zeigen können:

Ein horizontal gerichteter und zur Erde abgeleiteter Wasserstrahl von 2 mm Durchmesser wurde von geladenen Tropfen an der äußersten Peripherie getroffen. Die geladenen Tropfen lieferte ein isoliert (etwa 20 cm über dem Strahl), aufgestelltes Gefäß, das mit einer Batterie auf 200 Volt aufgeladen wurde. Durch eine enge Glaskapillare traten die Tropfen aus und wurden nach dem Anstoßen aufgefangen und gemessen, wie die Regentropfen.

Die Ladung jedes Tropfens betrug, wenn derselbe nicht anstieß, $80 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. Wenn derselbe aber den Wasserstrahl berührt hatte, wurde er immer bis auf eine kleine Restladung von $\sim 0,2 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. entladen, vorausgesetzt, daß die Stelle, wo der Tropfen den Strahl berührte, elektrostatisch abgeschirmt war. Sonst konnte schon die Ladung des Tropfgefäßes bewirken, daß der Tropfen nach der Berührung durch Influenz geladen war.

Obwohl dieses Experiment nicht direkt auf die Vorgänge in der Atmosphäre anwendbar ist, beweist es doch die Möglichkeit eines elektrischen Kontaktes zwischen Wassertropfen und einer andern Wasseroberfläche, ohne daß sich die beiden vereinigen. Es ist deshalb auch von diesem Standpunkt aus die Möglichkeit eines elektromotorischen

1) G. C. Simpson, Phil Mag. (6), 30, 1, 1915.

Vorganges, so wie ihn Elster und Geitel bei der Bildung der Niederschlagslektrizität sich vorstellen, nicht abzuweisen.

Ob aber ein solcher Vorgang wirklich die Ladung der Niederschläge bewirkt, kann ich aus meinen Messungen nicht zeigen, obschon ich ein besonderes Augenmerk auf die Beziehungen zwischen Niederschlagslektrizität und Potentialgefälle gerichtet habe. Es ist möglich, daß durch weitere Untersuchungen der Niederschläge nach der in dieser Arbeit dargestellten Methode die Verhältnisse sich mehr klären werden.

Über die Vereinbarkeit meiner Resultate mit den Hypothesen über Entstehung der Niederschlagslektrizität im allgemeinen und der Gewitterlektrizität im besonderen läßt sich folgendes sagen:

1. Nach der Wilson-Gerdienschen¹⁾ Auffassung soll die Kondensation des Wasserdampfes zuerst an Staubteilchen und in staubfreier Luft bei hohen Übersättigungen auch an den Ionen stattfinden, und zwar zuerst an den negativen Ionen und bei weiterer Übersättigung auch an den positiven.

Simpson²⁾ zeigte, daß die tatsächlich vorhandene Ionisierungsstärke der Luft nie ausreiche, um die großen Ladungen, die bei Gewittern mit den Niederschlägen zur Erde geführt werden, zu erklären. Dieser Einwand wird noch schwerwiegender dadurch, daß nach dem Ergebnis meiner Messungen die tatsächlich niedergeführte Elektrizitätsmenge noch größer ist, als man nach früheren Messungen annehmen mußte.

Ein weiteres Bedenken stützt sich darauf, daß die zu fordernden hohen Übersättigungen der Luft mit Wasserdampf um mehr als 400 Proz. (entsprechend einer 1,25 fachen adiabatischen Expansion) in der Natur nie auch nur annähernd beobachtet worden sind³⁾. Wohl aber kann man andererseits nach Gockel im Hochgebirge (3000 m Höhe) ein Gewitter an Ort und Stelle entstehen sehen, wo noch mit einem Staubgehalt von 500—1000 Teilchen im cm^3 zu rechnen ist und an eine vierfache Übersättigung nicht zu denken ist.

Mit meinen Messungen steht die Wilson-Gerdiensche Theorie insofern in Widerspruch, als der von ihr geforderte Überschuß der negativen Niederschlagsladung nicht besteht, sondern vielmehr ein, wenn

1) H. Gerdien, Phys. Zeitschr. 6, 658, 1905.

2) G. C. Simpson, Phil. Mag. (6), 17, 619, 1909.

3) A. Gockel, Phys. Zeitschr. 10, 396, 1909; Ders., Meteorol. Zeitschr. 26, 425, 1909.

auch nicht besonders großer, Überschuß positiver Ladungen vorhanden ist.

2. Für die von G. C. Simpson¹⁾ aufgestellte Gewittertheorie soll gerade ein positiver Überschuß sprechen.

Die durch Kondensation im aufsteigenden Luftstrom entstehenden Tropfen wachsen nur, bis ihr Gewicht 130 mg und ihre relative Fallgeschwindigkeit in bezug auf die umgebende Luft 8 m pro Sek. beträgt. In diesem Zustand wird der Tropfen instabil und zerplatzt. Dieser Vorgang soll nach den Experimenten von Simpson Elektrizität erzeugen. Die aufsteigende Luft ladet sich dabei negativ auf, während die zugehörige positive Elektrizität an den Wassertropfen bleibt.

Nach den spätern Untersuchungen von Lenard²⁾ ist ein solcher Vorgang nur dann Elektrizität erzeugend, wenn kleinste Tröpfchen aus der äußern Schicht der großen Tropfen herausgerissen werden. In dieser äußern Schicht nimmt Lenard eine Doppelschicht positiver und negativer Elektrizität an. Lenard glaubt auf Grund seiner Experimente eine Elektrizitätsentwicklung durch Tropfenzerfall in den Wolken nur bei tumultuarischer Aufwärtsbewegung der Luft annehmen zu dürfen.

Man würde nach dieser Vorstellung erwarten, daß bei Gewittern die großen Tropfen hauptsächlich das positive, die kleinen das negative Ladungsvorzeichen besitzen. Eine solche Scheidung findet sich aber nicht. Gewöhnlich sind sogar die negativ geladenen Tropfen durchschnittlich die größeren.

Dann spricht nach meiner Ansicht gegen die Simpsonsche Theorie, daß ich nie Tropfen von annähernd 130 mg Gewicht gefunden habe; denn es wäre zu erwarten, daß häufig Tropfen von ungefähr dieser Größe, ohne daß sie vorher zerplatzen, zur Erde und also auch auf das Elektrometer gelangen. H. Mache³⁾ hält allerdings auch ein Zerplatzen der großen Tropfen für möglich, wenn sie auf ihrer Bahn auf kleinere Tropfen stoßen. Bei diesem Vorgang muß der große Tropfen nicht notwendig schon die maximale Größe erreicht haben.

Andererseits spricht der gefundene positive Überschuß für die Simpsonsche Theorie und ebenso der Umstand, daß die größten Ladungen bei Böen und Gewittern vorkommen.

1) G. C. Simpson, Philos. Trans. Serie A, 209, 379, 1909; Ders., Phys. Zeitschr. 14, 1057, 1913; Ders., Phil. Mag. (6), 30, 1, 1915.

2) P. Lenard, Ann. d. Phys 47, 463, 1915.

3) H. Mache, Meteorol. Zeitschr. 36, 350, 1919.

3. Die Gewittertheorie von Elster und Geitel ist oben besprochen worden. Gerade der beobachtete häufige Zeichenwechsel und die starke Durchmischung positiver und negativer Elektrizität, sowie auch die hohen Potentiale der Tropfen können durch diese Theorie leicht erklärt werden.

Mit der Folgerung aus der Theorie, daß die großen Tropfen Ladungen besitzen, die dem gleichzeitigen Potentialgefälle (Luft—Erde) entgegengesetzt gerichtet sind, stimmen die Resultate meiner Messungen allerdings auch nicht überein. Eine strenge Verwertung dieser Tatsache könnte sich aber nur stützen auf die Kenntnis des Potentialgefälles am Orte und zu der Zeit des Entstehens der Tropfenladungen. Die Kenntnis des Potentialgefälles in der Nähe der Erdoberfläche genügt nicht. Daß das Potentialgefälle besonders während eines Gewitters sehr rasch schwankt, ist bekannt, und örtliche Verschiedenheiten innerhalb einer Wolke sind nach den Ballonbeobachtungen und denen Gockels¹⁾ auf dem Aletschgletscher auch sehr wahrscheinlich.

4. Nach der Auffassung von L. Sohncke²⁾ soll das Vorhandensein von Eis und Schnee (Graupeln) unter den Verdichtungsprodukten des Wasserdampfes in den Wolken eine notwendige Vorbedingung für ein Gewitter sein. Die Gewitterelektrizität entsteht durch Reibung von Wasser an Eis.

Der Einfluß der Eisreibung hat sich bei den beobachteten Hagelfällen als wahrscheinlich gezeigt, und daß die durch die Reibung erzeugten Elektrizitätsmengen von der Größenordnung der auf den Niederschlägen beobachteten sind, ergibt sich aus noch unveröffentlichten Beobachtungen Prof. Gockels.

5. Wenn auch die Wilson-Gerdiensche Theorie in ihrem eigentlichen Kern abgelehnt wird, so muß doch der Kondensationsvorgang als elektrisch sehr wirksam angenommen werden.

Die Kondensation findet nämlich mit Vorzug an Staub, Verbrennungsprodukten und andern Molekülkomplexen und an schweren Ionen (Molionen) statt, zu welch letzteren auch die radioaktiven Induktionen zu rechnen sind.

Es ist die meteorologisch wichtigste Rolle der Molionen, daß sie in erster Linie als Kondensationskerne für Wasserdampf in Betracht

1) A. Gockel, Neue Denkschriften d. Schweiz. Naturforsch. Gesellsch. Bd. 54, Abh. 1, S. 67—69.

2) L. Sohncke, Der Ursprung d. Gewitterelektr. u. d. gewöhnlichen Elektr. d. Atmosphäre. Jena 1885.

kommen und zur Entstehung der Stratuswolken, Bodennebel und niedern Cumuluswolken, vielleicht auch der höhern Wolken führen.

An Gewittertagen überschreitet zunächst die Zahl der kleinen Ionen beträchtlich die Mittelwerte¹⁾. Dann verraten sich gegen Mittag eintretende Niederschläge gewöhnlich schon am Morgen durch ungewöhnlich hohe Staubkernzahlen [100 000 und mehr in cm^3]²⁾ und so ist die Möglichkeit der Entstehung vieler schwerer Ionen geboten. Am Morgen³⁾ von Gewittertagen nimmt die elektrische Leitfähigkeit besonders hohe Werte an, wie unter anderm Schenk in Halle, Lutz in München, v. Schweidler in Mattsee, R. Thaller⁴⁾ am Gmundener See und Gockel in Freiburg fanden. Ebenso sind vor Gewittern die freien Raumladungen⁵⁾ groß.

Nach H. Bongards⁶⁾ ist endlich die Anwesenheit reichlicher Mengen radioaktiver Substanzen in der Atmosphäre geradezu ein Kennzeichen für ein entstehendes Gewitter. So hat der Wasserdampf genügend Gelegenheit bei der Kondensation geladene Nebelteilchen zu bilden.

Im Nebel entstehen dann Ionenstauungen⁷⁾, indem die in und entgegen der Richtung der Kraftlinien des Erdfeldes wandernden Ionen im Nebel einen Widerstand finden. Damit ist Gelegenheit zur Erhöhung der Feldkräfte innerhalb des Nebels und zur Vermehrung der Ladung der Nebelteilchen durch Ionenadsorption gegeben.

Nach F. v. Hauer⁸⁾ können Teilchen im stark ionisierten, elektrischen Felde ganz beträchtliche Ladungen durch Ionenadsorption annehmen.

Hierher gehören auch die Experimente von A. Schmauß⁹⁾, R. Seeliger¹⁰⁾ und R. Lehnhardt¹¹⁾, bei denen es sich allerdings um

1) A. Gockel, l. c. S. 18.

2) A. Gockel, l. c. S. 25.

3) A. Gockel, l. c. S. 20.

4) R. Thaller, Wien. Ber. **122**, 1817, 1914.

5) A. Daunderer, Über die in den unteren Schichten der Atmosphäre vorhandene freie Raumladung. Dissertation, München 1908. Meteorol. Zeitschr. **26**, 301, 1909; H. Mache, Phys. Zeitschr. **4**, 587, 1903.

6) H. Bongards, Meteorol. Zeitschr. **36**, 339, 1919.

7) H. Geitel, Phys. Zeitschr. **17**, 455, 1916.

8) F. v. Hauer, Ann. d. Phys. **61**, 303, 1920.

9) A. Schmauß, Ann. d. Phys. **9**, 224, 1902 und Ann. d. Phys. **32**, 871, 1910.

10) R. Seeliger, Ann. d. Phys. **31**, 500, 1910 und Ann. d. Phys. **33**, 531, 1910.

11) R. Lehnhardt, Ann. d. Phys. **42**, 45, 1913.

Ionenadsorption an relativ schnell fallenden Wassertropfen, ohne die Wirkung besonderer Feldkräfte handelt.

Die Kondensation auf geladenen Kernen zugeich mit der Ionenadsorption unter dem Einfluß von Feldkräften können genügen, um die elektrischen Ladungen der ruhigen Regen (Landregen) zu erklären. Der von Simpson und besonders der von Elster und Geitel herangezogene Vorgang und wahrscheinlich auch die Elektrisierung durch Eisreibung dürften dann die Rolle von Verstärkern in Böen und Gewittern spielen, und zwar wird die Influenzierung abspringender Tropfen, wie auch Geitel¹⁾ hervorhebt, am wirksamsten sein, wo feste Graupeln und Hagelkörner mitspielen. Nach den Erfahrungen Gockels²⁾ im Gebirge fehlen dieselben bei Gewittern über 2500 m niemals dort, wo die Entladungen in nächster Nähe des Beobachters niedergehen, und man wird wohl annehmen können, daß die bei Gewittern auch in der Niederung beobachteten großen Tropfen in der Regel geschmolzene Graupelkörner sind.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

1. Es fallen bei sämtlichen Niederschlägen auch innerhalb einer Minute auf eine Fläche von 6 cm² gewöhnlich Niederschlagsteilchen beiderlei Vorzeichens, so daß ein Registrator mit Minutenkontakt nicht die gesamte Elektrizität aufzeichnet, sondern die letztere je nach der Art des Regens 1,2 bis 5 mal größer ist als die vom Registrator mit kleiner Auffangfläche verzeichnete Elektrizitätsmenge.

2. Die Ladungen pro Gewichtseinheit Wasser sind größer als bis jetzt angenommen wurde; es wurde gefunden

a) bei Regenfällen im Mittel + 2,7 und $- 3,2 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. pro mg,

b) bei Schneefällen im Mittel + 11,6 und $- 8,1 \cdot 10^{-3}$ E.S.E. pro mg.

3. Bezüglich des Vorzeichens der Ladung der Einzeltropfen gilt:

Eine einfache Beziehung zwischen der Größe der Tropfen und ihrer Ladung läßt sich weder für den Durchschnitt sämtlicher Regenfälle, noch für einzelne Niederschläge oder Niederschlagsgruppen finden. Doch kann man sagen:

a) Bei Landregen sind die kleinen Tropfen fast ausschließlich positiv geladen, während bei den größeren das negative Vorzeichen häufiger auftritt als dies bei den kleinen der Fall war; die negativen Tropfen sind durchschnittlich größer als die positiven,

1) H. Geitel, Phys. Zeitschr. 17, 10, 1916.

2) A. Gockel, Denkschriften S. 74.

b) bei Böenregen und Gewittern sind kleine und große Tropfen bald positiv, bald negativ, wenn auch bei den Gewittern die negativen Tropfen durchschnittlich größer sind,

c) bei ruhigen Schneefällen sind umgekehrt die kleinen Teilchen vorherrschend negativ geladen und bei den großen findet sich das positive Zeichen häufiger.

4. Bezüglich des Verhältnisses des Vorzeichens der Tropfenladung zu dem des Potentialgefälles läßt sich sagen:

a) Einfache Beziehungen zwischen Tropfengröße, Tropfenladung und Potentialgefälle haben sich nicht ergeben, wenn auch häufiger, besonders bei Landregen, das Vorzeichen des gleichzeitigen Potentialgefälles dem Vorzeichen der Tropfenladung entgegengesetzt ist als ihm gleich,

b) bei ruhigen Schneefällen ist das Potentialgefälle vorherrschend positiv, während es bei Landregen vorherrschend negativ ist.

5. Betreffend Ladungsgröße, Spannung und Ladung pro Gewichtseinheit bei Einzeltröpfen:

a) Bei Landregen: Die größeren Tropfen tragen die größeren Ladungen; die Spannungen sind wenig verschieden und liegen gewöhnlich zwischen den Grenzen 0,5 und 10 Volt.

b) bei Gewittern: Die großen Tropfen haben nicht nur die größeren Ladungen, sondern auch die größeren Spannungen als die kleinen. Potentiale über 100 Volt (bis 300 Volt) kommen öfters vor. Die Spannung eines Tropfens mittlerer Größe berechnet sich zu 28 Volt.

Die Ladung pro Gewichtseinheit nimmt mit wachsender Tropfengröße bei Landregen und bei Gewittern ab.

6. Sämtliche Messungen ergaben im Mittel einen Überschuß positiver Elektrizität $\frac{E_+}{E_-} = 1,5$.

$(E_+ - E_-)/mg$ berechnet sich aus sämtlichen Messungen (Regen und Schnee), bei denen die Wassermenge nach der Absorptionsmethode bestimmt wurde, zu $0,48 \cdot 10^{-3}$ E.S.E.

7. Die Möglichkeit eines elektrischen Kontaktes zwischen Wassertropfen und einer Wasseroberfläche, ohne daß Zusammenfließen stattfindet, wird an einem Experimente gezeigt.

Vermerk: Vorliegende Arbeit ist ein auf Wunsch der Schriftleitung stark gekürzter Auszug aus einer Freiburger (Schw.) Dissertation. Eine ausführlichere Darlegung ist für später vorgesehen.

(Eingegangen am 5. Juni 1920.)

~~~~~  
Druck von August Pries in Leipzig.  
~~~~~