

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Die Luftelektrizität

Gockel, Albert

Leipzig, 1908

Drittes Kapitel. Elektrische Strömungen in der Atmosphäre

zieren, und daß diese um so höher sind, je trockener die durchstrahlten Schichten der Atmosphäre sind. Eine Wolke oder auch nur feuchte Luftschichten sollen die Wirksamkeit der Sonne vollständig aufheben. Ein vor das Elektrometer gestellter paraffinierter Schirm aus schwarzem Karton beeinträchtigt die Wirkung nicht, wohl aber ein solcher aus Metall. Die Wirkung könne innerhalb einer Minute im Verhältnis von 1:6 schwanken. Angesichts des Umstandes, daß die Sonne auf Bergen neben der stets vorhandenen indirekten Wirkung (durch Temperaturerhöhung) auch direkt durch die ultraviolette Strahlung die Ionisation erhöht, und der vor das Instrument gestellte Metallschirm das elektrische Feld und damit die Ionenverteilung beeinflusst, scheinen mir die Nodonschen Versuche kein Beweis dafür zu sein, daß die Sonne auf der Erde eine Ladung induziert.

Drittes Kapitel.

Elektrische Strömungen in der Atmosphäre.

1. Der normale Vertikalstrom. Wie wir gesehen haben, herrscht ständig eine Potentialdifferenz zwischen der Erde und den sie umgebenden Schichten der Atmosphäre. Da nun die Luft infolge ihrer Ionisierung ein verhältnismäßig guter Leiter der Elektrizität ist, so muß die erwähnte Potentialdifferenz die Ursache eines elektrischen Stromes werden, und zwar werden im allgemeinen positive Elektronen von der Atmosphäre in die Erdkruste eintreten. Dieser Vertikalstrom Luft-Erde würde in kurzer Zeit einen Ausgleich der Potentialdifferenz zwischen Erde und Luft herbeiführen, wenn nicht andere Prozesse existierten, welche die Potentialdifferenz immer wieder herstellten. Und das Grundproblem der Lehre von der Lufterlektrizität ist eben die Lösung der Frage nach der Ursache der ständigen Aufrechterhaltung der genannten Potentialdifferenz. Es ist klar, daß zur Lösung dieser Frage in erster Linie nötig ist die Kenntnis des Erde-Luftstromes nach Stärke und Richtung und zwar in den verschiedensten Gebieten der Erde; denn nur auf diese Weise kann festgestellt werden, ob die negativen Ladungen, welche an Orten mit negativem Potentialgefälle oder durch Niederschläge zur Erde herab-

gebracht werden, zahlenmäßig gleich sind den bei dem normalen positiven Potentialgefälle in die Höhe beförderten. Wie die vielen alten Hypothesen beweisen, welche zur Erklärung des normalen Potentialgefälles aufgestellt wurden, sind die verschiedenartigsten Ursachen der Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes denkbar, und es ist sehr wahrscheinlich, daß verschiedene Faktoren an diesem Regenerierungsprozeß beteiligt sind.

Mit dem Transport von Elektrizität durch Niederschläge, der im Elektrizitätshaushalt der Erde eine große Rolle spielt, werden wir uns in Abschnitt 3 beschäftigen. Zunächst wenden wir uns der Besprechung des normalen Leitungsstromes zu.

Bezeichnet dV/dh das Potentialgefälle und λ die spezifische Leitfähigkeit der Atmosphäre, so ist nach dem Ohmschen Gesetz die Dichte des vertikalen Leitungsstromes gegeben durch $dV/dh \times \lambda$, wobei $\lambda = (n_+ v_+ + n_- v_-) \epsilon$.

Für die numerische Rechnung haben wir zu berücksichtigen, daß das Potentialgefälle jetzt in elektrostatischen Einheiten (= 300 Volt): cm und der Ionengehalt in elektrostatischen Einheiten pro Kubikzentimeter ausgedrückt werden muß. Wir wollen nach früher

Gesagtem setzen $dV/dh = 100 \text{ Volt/m} = \frac{100}{300 \times 100} \text{ E. S. E./cm} = \frac{1}{300} \text{ E. S. E./cm}$, $\epsilon n_+ = 0,30 \times 10^{-6}$, $v_+ = 1 \times 300$, $\epsilon n_- = 0,25 \times 10^{-6}$, $v_- = 1,1 \times 300$, dann ist $\lambda = 5,75 \times 300 \times 10^{-7} = 17,25 \times 10^{-5}$ und $dV/dh \times \lambda = 5,75 \times 10^{-7} \text{ E. S. E.} = 1,9 \times 10^{-16} \text{ Amp./qcm}$.

Zu diesem so bestimmten Leitungsstrom tritt noch der Konvektionsstrom, d. h. der Transport von elektrischen Ladungen (Ionen, geladene Staub- und Wasserteilchen) durch die Luftströmung. Derselbe ist relativ nicht so gering, als man früher angenommen hat. Die Vertikalkomponente der Luftbewegung bleibt allerdings in der Regel unter 10 cm/sec^1 . Rechnet man aber auch mit einem mittleren Wert von 5 cm/sec , so erhält man bei einer räumlichen Ladungsdichte von $\rho = 0,6 \text{ E. S. E. pro cbm}$, wie sie Dauderer (siehe S. 108) als Mittel vom Frühjahr bis Herbst gefunden hat, einen Konvektionsstrom von $5 \times 0,6 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-6} \text{ E. S. E.} = 1 \times 10^{-15} \text{ Amp./qcm}$, also einen Wert, der fünfmal größer ist als der des Leitungsstromes. Nimmt man aber für die räumliche Ladung das Mittel aus allen Beobachtungen Dauderers, so erhält man

1) Anmerkung bei der Korrektur. Nach neueren Messungen Hergesells ist dagegen die Vertikalkomponente im allgemeinen viel größer und steigt bis zu 125 cm/sec .

$\rho = 0,1$, also den Konvektionsstrom $= 0,5 \times 10^{-6}$ E. S. E. oder $1,7 \times 10^{-16}$ Amp./qcm, einen Wert, der noch immer gleich ist dem des Leitungsstromes. Es ist nun klar, warum bei den Veränderungen des Potentialgefälles, besonders bei der täglichen Periode, die Luftbewegung eine so bedeutende Rolle spielt.

2. Der vertikale Leitungsstrom. Indem man sich in den letzten Jahren mit Eifer auf das von Elster und Geitel neu erschlossene Gebiet des Studiums der Leitfähigkeit der Atmosphäre warf, hat man, wie mir scheint, schon die Betrachtung des Verlaufs des Potentialgefälles, auf das doch die neueren Forschungen auch ein neues Licht geworfen, und noch viel mehr die des Vertikalstromes zu sehr in den Hintergrund gedrängt. Die spezifische Leitfähigkeit der Atmosphäre trägt einen ausgesprochen lokalen Charakter, sie ändert sich nicht nur örtlich, und zwar sprunghaft an den Grenzen von Dunstschichten und Wolken, sondern ebenso rasch auch zeitlich, z. B. beim Beginn der Taubildung, auch wenn das Auge keine Kondensationsvorgänge in der Luft selbst wahrnehmen kann. Das Potentialgefälle trägt teilweise ebenfalls einen lokalen Charakter, häufig sind seine Werte annähernd umgekehrt proportional der Leitfähigkeit, d. h. es ändert sich so, daß das Produkt aus Leitfähigkeit und Potentialgefälle, also der vertikale Leitungsstrom mehr oder minder konstant bleibt; andererseits treten aber auch Änderungen des Potentialgefälles auf, die nicht durch Änderungen der Leitfähigkeit am Beobachtungsort selbst, sondern durch Veränderungen der freien Ladungen in der Nachbarschaft desselben oder in den höher oder tiefer gelegenen Schichten der Atmosphäre bedingt sind. Der Vertikalstrom scheint demnach örtlich und zeitlich eine größere Konstanz als seine Faktoren Potentialgefälle und Leitfähigkeit zu besitzen, seine Stärke hängt, da er die Tendenz hat, längs der Vertikalen konstant zu bleiben, nicht von den Verhältnissen an einem einzigen Ort, sondern von denen der ganzen, oberhalb und auch unterhalb des Beobachtungspunktes befindlichen Luftschicht ab. Während also Ionisation und Leitfähigkeit ebenso wie Thermometer und Hygrometer nur über die an einem bestimmten Ort herrschenden Verhältnisse Aufschluß geben, hängt die Stärke des Vertikalstromes ebenso, wie dies die Angaben der zur Messung des Wassergehaltes der Atmosphäre verwendeten Spektroskope, der Aktinometer und der Polariskope tun, von der Summe der Zustände innerhalb einer ausgedehnten Luftschicht ab. Infolge

dessen ist auch sowohl die Bestimmung seines absoluten Wertes, als auch die Verfolgung seiner zeitlichen Schwankungen von hervorragendem theoretischem Interesse.

Bestimmungen der spezifischen Leitfähigkeit durch getrennte Messungen der Ionenzahlen und Beweglichkeit sind umständlich und zeitraubend, auch nicht genau durchzuführen, weil sich die Faktoren während der zu ihrer Messung nötigen Zeit selbst ändern können. Dagegen läßt sich die spezifische Leitfähigkeit für viele Zwecke genügend genau sowohl mit dem Zerstreuungsapparat, z. B. in der Form, die ihm Schering gegeben hat, als auch mit dem S. 25 beschriebenen Gerdienschen Apparat messen. Solche Messungen verbunden mit der Bestimmung des gleichzeitig herrschenden Potentialgefälles liefern uns nach dem eben Gesagten durch Multiplikation der gewonnenen Zahlen den gesuchten vertikalen Leitungsstrom. Bequemer und exakter ist es jedoch, die gesuchte Größe direkt und nicht die einzelnen Faktoren zu messen.

Den ersten Versuch hierzu hat Ebert ¹⁾ unternommen. Eine 2 qm große Weißblechtafel wurde von isolierenden Trägern 4 m hoch in der Luft gehalten. Von der Platte führte ein Draht zu einem Doppelschlüssel, mit dessen Hilfe die Platte 1. direkt geerdet, 2. isoliert und 3. durch ein hochempfindliches Galvanometer zur Erde abgeleitet werden konnte. Es wurde nun in folgender Weise verfahren: Die Platte wurde direkt mit der Erde verbunden und lud sich auf das Potential der Erdoberfläche, d. h. wurde, da nur bei klarem Wetter, also bei 'Schönwetterelektrizität', und damit bei positivem Gefälle gearbeitet wurde, negativ in bezug auf die umgebenden atmosphärischen Massen. Hierauf wurde 2. die Platte von der Erde abgeschaltet und eine hinreichende Zeit lang isoliert sich selbst überlassen. Während dieser Zeit mußte die negative Elektrizität der Platte durch die herangezogenen positiven Ionen der Luft neutralisiert werden. Wurde dann 3. die Platte durch das Galvanometer hindurch geerdet, so zeigte sich in der Tat unter den genannten Bedingungen stets ein Ausschlag, der einem Strome von positiver Elektrizität entsprach, der von der Platte zur Erde ging. Die Wirkung wurde wesentlich erhöht, wenn die Platte mit Rasenstücken, Tannenzweigen oder andern Pflanzenteilen bedeckt wurde. Der elektrische Ausgleich zwischen der auf das Potential des Erdbodens gebrachten Platte, und der umgebenden Luft von niederem Potential vollzog sich

1) H. Ebert, Phys. Zt. 3, 338. 1902.

bei der Bedeckung der Platte mit Vegetation im Mittel schon innerhalb 5 Minuten. Die pro Zeiteinheit zwischen Erde und Atmosphäre ausgetauschte Elektrizitätsmenge ist, wie nach den Elster- und Geitelschen Versuchen zu erwarten war, am größten bei klarem, am geringsten bei trübem Wetter.

Bei dem Verfahren von Ebert besitzt die Platte nur unmittelbar nach Unterbrechung der Verbindung mit der Erde das Potential derselben; während des Versuches selbst ladet sie sich auf

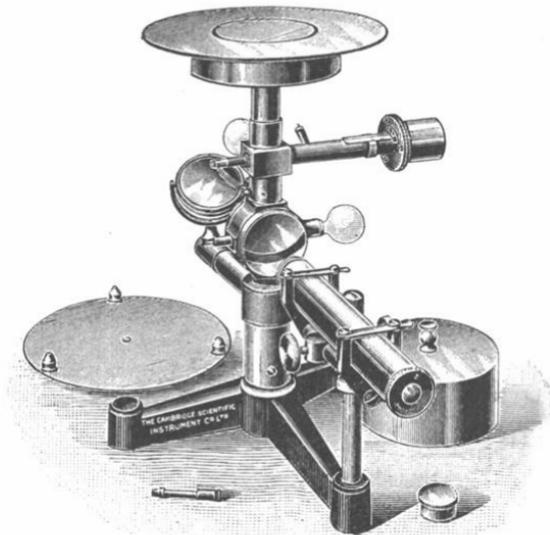


Fig. 25a.

das der sie umgebenden Luft, die Stärke des zu messenden Stromes sinkt also ziemlich rasch auf Null herab. Diesen Übelstand vermeidet ein von Wilson¹⁾ konstruierter Apparat, der erlaubt, während der ganzen Dauer der Messung das Potential der Untersuchungsplatte auf Null, d. h. auf dem Potential des Erdbodens zu halten. Den wesentlichsten Teil des Instrumentes (Fig. 25a u. b) bildet ein kleines Goldblattelektrometer (Länge des Goldblattes E 1,1 cm, Breite 0,1 bis 0,2 mm). Das Gehäuse desselben wird getragen von einer kleinen Leydener Flasche D und steht mit deren inneren

1) C. T. R. Wilson, Proc. of Cambridge Phil. Soc. **13**, 184 u. 363, 1906; Proc. Roy. Soc. A., **80**, 537, 1908.

Belegung in leitender Verbindung. Für luftelektrische Messungen ladet man die Leydener Flasche auf zirka $+ 50$ Volt. Wenn das Goldblatt mit der Erde in leitender Verbindung steht, so differiert sein Potential von dem des Gehäuses demnach um 50 Volt, es ist also abgelenkt. Die Ablenkung wird mit Hilfe eines mit Oku-

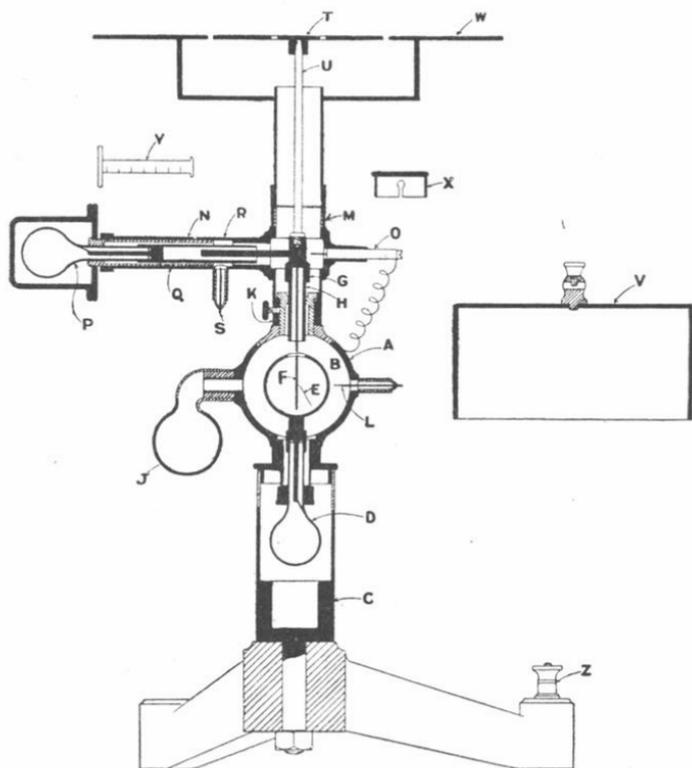


Fig. 25b.

larskala versehenen Mikroskopes beobachtet. Die Isolation der aus versilbertem Quarzglas bestehenden Leydener Flasche ist eine so gute, daß die Ladung im Verlauf von 24 Stunden nur um kleine Bruchteile eines Volt sich ändert. Bei der eben angegebenen Ladung der Flasche kann man Potentiale von -5 bis $+5$ Volt messen, erhöht man das Potential des Goldblattes, so verschwindet dasselbe aus dem Gesichtsfeld, bei 50 Volt erreicht die Ablenkung ihr Minimum, um bei weiterer Erhöhung des Potentials

wieder zu steigen, in der Nähe von 100 Volt tritt das Goldblättchen wieder in das Gesichtsfeld, und man kann wieder in einem Intervall von +95 bis +105 Volt messen. Natürlich lassen sich bei Änderung der Ladung der Leydener Flasche auch beliebige andere Potentiale bestimmen. Der seitliche Tubus N trägt ebenfalls eine versilberte Quarzflasche P , auf deren Hals die mit der inneren Belegung in leitender Verbindung stehende Röhre Q aufsitzt. Zusammen mit dem Draht R , welcher seinerseits mit dem Goldblatt des Elektrometers in leitender Verbindung steht, bildet die Röhre Q einen Kondensator, dessen Kapazität durch Verschiebung von Q beliebig geändert werden kann. Die letztere läßt sich an einer Millimeterskala V ablesen. Hat man den Kondensator geladen, so kann man durch Verschiebung von Q das Potential des Goldblättchens beliebig ändern. Das Gefäß I enthält ein Trockenmittel. Für luftelektrische Messungen wird auf den Trägern des Goldblattes G vermittels des Stäbchens U die Untersuchungsplatte T von etwa 7 cm Durchmesser aufgesetzt. Dieselbe ist umgeben von dem abnehmbaren Schutzring W . Auf diesen kann der Deckel V aufgesetzt werden. Das Elektrometer wird auf einen Dreifuß gestellt und das Goldblatt mit Hilfe des Drahtes O für einen Augenblick gerdet. Wenn man nun den Deckel V abnimmt, ändert sich das Potential der Platte T , und das Goldblättchen wird abgelenkt. Da der Deckel V , welcher mit der Erde in leitender Verbindung stand, gewissermaßen einen Teil der Erdoberfläche bildete, so mußte er auf der Platte T eine der Flächendichte σ der Erde proportionale Elektrizitätsmenge influenzieren. Diese Elektrizitätsmenge muß jetzt der Platte wieder zugeführt werden, um sie wieder auf das Potential Null und damit das Goldblättchen wieder in seine Anfangsstellung zu bringen. Aus dem Betrag der dazu nötigen Verschiebung des Kondensators Q und seiner vorher auf einfache Weise zu ermittelnden Ladung läßt sich diese Elektrizitätsmenge und damit eine der Ladungsdichte σ der Flächeneinheit der Erde und dem Potentialgefälle dV/dh proportionale Größe bestimmen¹⁾.

Man hält nun das Potential der Platte während einiger Zeit (5–10 Minuten) auf Null, in dem man die infolge der elektrischen

1) Auf analoge Weise kann man auch ohne Kondensator mit jedem mit Untersuchungsplatte, Schutzring und Deckel versehenen Elektrometer das Potentialgefälle in relativem Maße bestimmen.

Strömung in die Platte eintretende Elektrizitätsmenge stets kompensiert durch Verschiebung des Kondensators; setzt man dann den Deckel auf und bringt das Potential des Goldblättchens wieder auf Null, so gibt die Änderung der Stellung des Kondensators gegenüber seiner Anfangsstellung die Elektrizitätsmenge an, die während der Exposition der Platte in diese eingetreten ist: Die Messung ergab also 1. die Flächendichte der Platte σ , d. i. eine dem Potentialgefälle proportionale Größe und 2. die Elektrizitätsmenge, die während einer bestimmten Zeit in die auf dem Potential der Erde gehaltene Platte von bekannter Oberfläche eintrat, das ist der gesuchte Vertikalstrom. Bedeckt man die Untersuchungsplatte mit Erde oder Rasenstücken, so muß selbstverständlich infolge der Vergrößerung der Oberfläche auch die Geschwindigkeit, mit der die Ladung der Platte sich zerstreut, zunehmen.

Bestimmungen des Leitungsstromes durch gleichzeitige Messung des Potentialgefälles und der Leitfähigkeit hat Gerdien ¹⁾ vorgenommen. Als Mittelwert von 50 meistens bei anticyklonaler Wetterlage auf einer Waldwiese vorgenommenen Messungen fand er für den vertikalen Leitungsstrom, d. h. die pro Sekunde aus dem qcm Oberfläche aus- oder eintretende Elektrizitätsmenge zu $8,000 \times 10^{-7}$ E. S. E. in guter Übereinstimmung mit Ebert, der nach seiner Methode auf einer Waldwiese bei München im Mittel 5×10^{-7} E. S. E. = $1,7 \times 10^{-6}$ Ampère pro km² gefunden hatte. Ebenso stimmen die von Wilson selbst, ferner die von Burbank ²⁾ in Labrador und die vom Verfasser in Freiburg (Schweiz) nach dem Wilsonschen Verfahren erhaltenen Werte zum Teil sehr gut mit den Gerdienischen überein. In Prozenten der Ladung ausgedrückt fand Wilson den Zerstreungskoeffizient auf einem flachen Hügel zu 3—16, ich hier im Mittel zu 12 Proz. pro Minute. Als bemerkenswert hebt Gerdien die geringe zeitliche Änderung des Leitungsstromes an manchen Tagen hervor. Auch nach meinen Beobachtungen sind, solange keine Niederschläge in der Nähe des Beobachtungsortes eintreten, die Veränderungen des vertikalen Leitungsstromes im Laufe des Tages gering. Von niederen Werten ($0,2 \times 10^{-2}$ E. S. E. pro qcm und Minute) steigt der Strom in den Morgenstunden auf ungefähr 0,5 und hält sich in dieser Höhe bis nach Sonnenuntergang, wo wieder niedere Werte eintreten.

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1907, 77.

2) J. E. Burbank, Terr. Magn. 12, 97, 1907

Nach den im Ballon von Gerdien¹⁾ gemachten Beobachtungen zeigt der Erde-Luftstrom in der Richtung der Vertikalen eine bemerkenswerte Konstanz. Während in den durchfahrenen Schichten von 6000 m Höhe Potentialgefälle und Leitfähigkeit einzeln sich im Verhältnis von 1:25 resp. 1:27 änderten, schwankte die Intensität des Vertikalstromes im Verhältnis 1:4. Bei einer 2. Fahrt, die im Gebiet eines aufsteigenden Luftstromes stattfand, schwankten Potentialgefälle und Leitfähigkeit wie 1:4 resp. 1:6, die Stromintensität dagegen nur wie 1:2. Eine konstante Ab- oder Zunahme mit der Höhe fand nicht statt; nur an den oberen und unteren Grenzen der Absorptionsschichten stellten sich Sprünge ein. Würde in der Höhe eine zeitliche konstante Nachlieferung positiver Ionen stattfinden, die Potentialdifferenz zwischen Erde und Höhe konstant bleiben, so könnte sich auch die Stromstärke mit der Höhe nicht ändern, das Potentialgefälle müßte an jeder Stelle umgekehrt proportional der Leitfähigkeit sein. Wie man sieht, weicht das wirklich beobachtete Verhalten von dem bei konstanter Potentialdifferenz zu erwartende nicht allzu sehr ab. Wird das Potentialgefälle negativ, so tritt anstatt der normalen Einwanderung positiver Ionen in der Erdoberfläche eine solche negativer ein. Da die negativen Werte des Potentialgefälles gewöhnlich sehr hoch sind, so kann ein großer Teil der durch den normalen Vertikalstrom der Erde zugeführten positiven Elektrizität durch den umgekehrt gerichteten kompensiert werden. Die Betrachtung des sogenannten gestörten Stromes ist also deshalb wichtig, weil sie uns allein die Antwort geben kann auf die Frage, wie trotz der fortwährenden Wanderung positiver Ionen nach der Erde hin die Potentialdifferenz zwischen dieser und der Atmosphäre aufrecht erhalten bleibt, so daß die Erde gegenüber der letzteren fast stets negativ geladen erscheint.

3. Niederschlagselektrizität. Die von den Niederschlägen zur Erde geführten Elektrizitätsmengen haben zuerst Elster und Geitel²⁾ in folgender Weise zu messen versucht: Sie fingen die Niederschläge auf einer gut isolierten und mit einem Elektrometer verbundenen Schale auf und maßen so die Ladung, welche durch die Niederschläge während einer bestimmten Zeit der Erde zugeführt wurde. So einfach die Methode im Prinzip ist, so viel Vorsichts-

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1905, 258.

2) Met. Zt. 5, 1888 u. Wien. Ber. 94, 421, 1890; Terr. Magn. 4, 15, 1899.

maßregeln verlangt sie bei der praktischen Ausführung. Zunächst ist die Schale selbst gegen eine Influenz des elektrischen Erdfeldes zu schützen. Dieses geschieht dadurch, daß man dieselbe nebst ihrem Stativ mit einem Metallzylinder umgibt. Ferner muß verhütet werden, daß Regentropfen in den Apparat spritzen, die geerdete Teile schon berührt haben; denn dadurch würde das Verhältnis der erhaltenen Elektrizitätsmenge zum aufgefangenen Wasser gefälscht, besonders wenn Tropfen, die den oberen Rand des Schutzzylinders oder andere dem Erdfeld stark exponierte Gegenstände berührt haben, in den Apparat gelangen; bei dem starken Felde überziehen sich nämlich die letztern mit einer elektrischen Schicht von erheblicher Dichte und die von ihnen abspritzenden Tropfen müssen sich ebenfalls aufladen und nicht unbedeutliche Elektrizitätsmengen mit auf die Schale bringen. Elster und Geitel umgeben deshalb den Schutzzylinder noch einmal mit einem an 4 Pfählen befestigten, viel weiteren und höheren offenen Mantel aus Drahtgeflecht, der den Zweck hat, die elektrische Dichte auf dem Rand des Schutzzylinders zu vermindern, während dieser selbst so weit entfernt ist, daß bei ruhiger Luft die in ihm verspritzenden Tröpfchen nicht in die Auffangschale gelangen können. Bei starkem Wind wird es auch unter Beobachtung dieser Vorsichtsmaßregeln kaum möglich sein zu beobachten, da dann kaum verhindert werden kann, daß Tröpfchen, die schon mit der Hauswand oder Bäumen in Berührung waren, in das Gefäß gelangen. Der Apparat muß auf jeden Fall in genügendem Abstand von dem Hause oder von Bäumen und ähnlichen Gegenständen aufgestellt werden. Der von der Schale zu dem im Hause aufgestellten Elektrometer führende Draht ist selbstverständlich gegen die Wirkung des Erdfeldes und der Niederschläge durch ein ihn umgebendes Rohr zu schützen. Ein an einer Schnur passend befestigter Deckel erlaubt, das Auffanggefäß vom Laboratorium aus zu öffnen oder zu schließen.

Bequemer dürfte es sein, die Auffangschale direkt auf das Elektrometer zu setzen, wie dieses Gerdien¹⁾ getan hat. Instrument und Beobachter müssen dann durch ein mit passender Öffnung versehenes Zelt, das nur die Niederschläge auf die Schale gelangen läßt, geschützt sein. Als Elektrometer wird ein Quadrantelektrometer verwendet. Man kann dann photographische Registrierung

1) H. Gerdien, Phys. Zt. 4, 837, 1903. (Bezugsquelle des Apparates Spindler & Hoyer, Göttingen.)

(Gerdien) oder mechanische mit Hilfe des Benndorfschen Elektrometers (Kaehler)¹⁾ verwenden, Saitenelektrometer werden sich wohl ebenfalls sowohl für direkte Messungen als auch Registrierungen verwenden lassen, besonders wenn man durch geeignete Konstruktion der Schale und des Schutzzylinders dafür sorgt, daß der Hauptvorzug dieser Elektrometer, ihre geringe Kapazität auch zur Geltung kommt.

Die Resultate Elsters und Geitels sowohl als Gerdiens lassen erkennen, daß die oben bezeichnete Fehlerquelle, Ladung des Elektrometers durch verspritzende Tropfen mit einer der atmosphärischen entgegengesetzten Influenzelektrizität durch die getroffenen Schutzmaßregeln vermieden ist; denn die genannten Forscher erhielten oft längere Zeit Übereinstimmung zwischen Niederschlags- und atmosphärischer Elektrizität. Vollständig ausgeschlossen hat Weiss²⁾ den Einfluß der verspritzenden Tropfen dadurch, daß er die Niederschläge auf einer gut isolierten Bürste auffing und diese erst nach erfolgtem Aufladen unter einem Schirm in das Laboratorium brachte, wo sie mit dem Elektrometer (Hankel) in Verbindung gesetzt wurde. Die Methode von Weiss schließt allerdings Registrierungen aus, besitzt aber den Vorteil der Einfachheit. Sie macht die Schutzhüllen, Rohrleitung, Zelte überflüssig. Das Auffangen der Niederschläge kann an jeder Stelle vorgenommen werden, an der die Auffangvorrichtung gegen von Bäumen und Dächern verspritzende Tropfen gesichert ist.

Die sämtlichen genannten Forscher haben neben der Ladung der Niederschläge auch das während des Fallens herrschende elektrische Erdfeld, Weiss auch nach der Wiessnerschen³⁾ Methode die Zahl und Größe der Tropfen bestimmt. Die Messungen des Potentialgefälles werden durch die außerordentlich starken Schwankungen, die bei Gewitterregen von +10000 bis -10000 Volt/m gehen, erschwert. Elster und Geitel geben eine Methode an, auch die hohen Potentiale durch Abzweigung von einem Widerstand mit einem Bohnenbergerschen Elektrometer zu messen.

Die bis jetzt erhaltenen Resultate sind noch wenig übersichtlich. Man kann aber mit Gerdien 3 Gruppen von Niederschlägen unterscheiden.

1. Landregen und lang andauernde Schneefälle. Diese sind meistens von negativem Potentialgefälle begleitet, auch wird nach

1) K. Kaehler, Phys. Zt. 9, 258, 1908.

2) E. Weiss, Wien. Ber. 115, 1299, 1906.

3) I. Wiessner, Wien. Ber. 104, 1, 1397, 1895.

Beobachtungen des Verfassers während des Fallens $Q < 1$, d. h. es überwiegen die negativen Ionen. Starke positive Felder sind während des Fallens solcher Niederschläge sehr selten: Das Vorzeichen der Niederschlagselektrizität selbst wechselt, doch überwiegt bei den Regen im allgemeinen die negative Ladung. Der Schnee ist dagegen sehr häufig positiv geladen. Auch wird während der winterlichen Schneefälle das Erdfeld in der Regel positiv, und dem entsprechend $Q > 1$. Ändert sich die Eigenelektrizität des Schnees, so ändert sich mit ihr auch das Zeichen des Erdfeldes. Luft- und Niederschlagselektrizität gehen also in der Regel parallel. Die Tatsache, daß während des Fallens positiv geladener Niederschläge auch die Zahl der positiven Ionen überwiegt, erscheint schon deshalb beachtenswert, weil hier ein Lenard-Effekt ausgeschlossen ist.

Die der Erdoberfläche durch die Niederschläge zufließenden Ströme gehen bis zu 10^{-14} Amp/qcm herauf, sind jedoch meistens geringer, es scheinen auch fast unelektrische Regen vorkommen zu können, und zwar sind es hauptsächlich die schwachen Niederschläge, die weder eine größere Eigenelektrizität besitzen, noch das Erdfeld erheblich stören. Die Störungen des normalen Erdfeldes, welche ein Regen erzeugt, können sich, wie schon Palmieri bemerkt hat, in weitem Umkreis, nach Elster und Geitel¹⁾ sogar noch auf eine Entfernung von 800 km, bemerkbar machen. Das Potentialgefälle kann dann negativ werden, wenn am Beobachtungsort auch heiterer Himmel herrscht. Zur Regenprognose läßt sich der Gang des Potentialgefälles nicht verwenden, wohl aber lassen sich aus demselben Schlüsse über das Auftreten von Niederschlägen in der Nachbarschaft ziehen.

2. Böenregen und die böigen Schnee- und Graupelfälle sind charakterisiert durch periodisch wechselnde Feldrichtung, die Feldstärke zeigt oft Schwankungen von kürzerer Periode, die sich über die Änderungen von längerer Dauer und größerer Amplitude lagern. Das Potentialgefälle kann innerhalb weniger Sekunden von -6000 zu $+6000$ Volt/m übergehen. Mit dem Wechsel der Art des Niederschlags tritt immer auch ein Wechsel des Vorzeichens ein; so daß der Gang der atmosphärischen Elektrizität entweder dem der Niederschlagselektrizität ständig parallel oder ständig entgegengesetzt bleibt, also die eine Kurve ein Spiegelbild der anderen gibt. Die

1) J. Elster u. H. Geitel, Wien. Ber. 98, 953, 1889.

Stromdichte der Niederschlagslektrizität ist etwa 10^{-13} Amp/qcm. Sämtliche Beobachter haben bei der überwiegenden Mehrzahl der untersuchten Böen beim Heranziehen positives, und zwar recht hohes Potentialgefälle gefunden. Auch die zuerst fallenden Niederschläge sind häufiger positiv als negativ. Im ganzen überwiegt auch bei den Böenregen die zur Erde geführte negative Ladung. Am Ende eines Böenregens herrscht in der Regel ein Zeichen Gegensatz zwischen Niederschlags- und Luftpotelektrizität. Zwischen einander folgenden Böenregen, Graupel- oder Schneeschauern wird gewöhnlich hohes Potentialgefälle und ein auffallender Reichtum positiver Ionen beobachtet. Es ist dieses eine Folge der absteigenden Luftbewegung im Rücken der Böe. Die Niederschlagslektrizität geht oft am Schluß der Böe auf Null zurück. Bemerkenswert erscheint, daß nach den Beobachtungen von Kaehler¹⁾ während des Auftretens von Böen der Gang des Potentialgefälles an 2 ungefähr $1\frac{1}{2}$ km voneinander entfernten Stationen eine bessere Übereinstimmung zeigt als bei schönem Wetter. Diese Übereinstimmung ist sogar eine so regelmäßige, daß sie sich zur Bestimmung der Zugsgeschwindigkeit der Regenwolken benutzen läßt. Lord Kelvin, Chauveau, Kaehler, haben die Beobachtung gemacht, daß Störungen während Regen häufig in der Weise eintreten, daß das Potentialgefälle am Boden negativ wird, während es selbst in Höhen von nur 20 m über demselben noch positiv bleibt. Nach Chauveau bildet ein solcher Gegensatz im Vorzeichen des im Bureau central und auf dem Eiffelturm beobachteten Gefälles sogar die Regel für gewisse ruhige Regen. Das Gefälle weist in diesen Fällen in der Höhe nur eine schwache Verminderung auf. Selbst niedere Morgennebel können diese Wirkung hervorbringen. Man könnte zunächst bei dieser negativen Elektrisierung an die Wirkung eines Lenard-Effektes denken, der nur bemerkbar wird in der Nähe des Bodens, auf den der Regen auffällt, aber schon bei den Nebeln ist diese Erklärung nicht mehr annehmbar, und sie wird vollständig hinfällig durch die Beobachtungen von Kaehler, daß auch das Umgekehrte eintritt, daß nämlich während des Regens oben negatives Gefälle, unten positives herrscht. Wir haben hier offenbar die Erscheinung, und darauf weist ihr Auftreten bei Nebeln hin, vor uns, die bei Ballonfahrten an der oberen und unteren Grenze von Absorptionsschichten bemerkt wird.

3. Die Gewitterregen unterscheiden sich nur graduell von

1) K. Kaehler, Met. Zt. **25**, 155 u. 289, 1908.

den Böenregen. Das Erdfeld kann die Stärke von 10000 Volt/m erreichen und die Stärke des mit den Niederschlägen zur Erde gehenden Stromes auf 10^{-12} Amp/qcm, also das Hundertfache des bei Landregen beobachteten Wertes steigen. Die Zeichenwechsel der Luftpotezialität gehen außerordentlich rapid vor sich. Es ist daher möglich, daß die Kollektoren, die zur Aufladung auch im günstigsten Fall einiger Sekunden bedürfen, den raschen Schwankungen des Potentialgefälles nicht immer vollständig zu folgen vermögen, und daß dieses in Wirklichkeit noch größer sein kann als eben angegeben. Zerstreungsmessungen sind während Gewittern auch an Orten, die man im allgemeinen als gegen den Einfluß des Erdfeldes geschützt ansehen kann, nicht möglich; die Elektroskopplättchen eines solchen Apparates befinden sich auch in einem gedeckten Gartenhaus oder einer Veranda oft in beständigen Zuckungen¹⁾. Blitzentladungen führen nur für wenige Sekunden einen Ausgleich der elektrischen Differenzen herbei. Das Potentialgefälle steigt sofort nach dem Blitzschlag wieder auf den früheren Wert oder es wächst rasch im entgegengesetzten Sinne. Die Niederschlagsselektrozität ist aber merkwürdigerweise im Anfang eines Gewitters oft relativ schwach und wird erst von beträchtlicher Größe, wenn die elektrischen Entladungen nachlassen und das Gewitter abziehen beginnt. Bei starker Eigenelektrozität der Niederschläge kann deren Fallgeschwindigkeit durch die Wirkung des Erdfeldes, je nach dem die Zeichen der beiden gleich oder entgegengesetzt sind, beschleunigt oder verzögert werden. Gerade wie beim Herannahen von Böen, weist auch beim Herannahen von Gewittern das Potentialgefälle in der Regel hohe positive Werte auf, die erst beim Fallen der Niederschläge in eben so hohe negative übergehen. Wenn schon beim Überziehen des Himmels mit einer Cumulonimbus- oder Cirrostratusschicht ein stark negatives Gefälle auftritt, so scheint dieses nach Beobachtungen des Verfassers, die allerdings noch der Bestätigung bedürfen, sogar ein Zeichen zu sein, daß es am Beobachtungsorte selbst nicht zu einer Entladung des Gewitters kommt. Die starken Schwankungen, die das elektrische Feld während des Fallens böenartiger Niederschläge erleidet, erklären sich dadurch, daß dasselbe abhängt:

1. von den elektrischen Ladungen der Atmosphäre am Beobachtungsort,

1) Vgl. G. Costanzo e. C. Negro, Rivista di fisica VIII, No. 92, 1907.

2. von den durch die Niederschläge und

3. von den durch entfernte Wolken influenzierten Ladungen.

Daß die atmosphärische Leitfähigkeit während Gewittern außerordentlich hohe und schwankende Werte erreichen kann, ist schon früher angegeben.

Die Größe der Regentropfen kann nach den Messungen Lenards, die von Defant bestätigt wurden, während eines und desselben Platzregens zwischen 0,5 und 5 mm Durchmesser schwanken. Eine Beziehung der Eigenladung der Tropfen zu ihrer Größe haben die vorliegenden Messungen nicht ergeben. Ladung und Spannung der einzelnen Tropfen schwanken sehr stark, letztere nach den Schätzungen von Elster und Geitel zwischen 0 und 30 Volt. Die Ladung beträgt nach Weiss ca. 10^{-4} E. S. E. Am konstantesten erscheint, wenigstens bei Regenfällen, die Ladung der Gewichtseinheit. Dieselbe beträgt nach Weiss etwa 10^{-3} E. S. E. pro Milligramm.

Einer eigentümlichen von Elster und Geitel beobachteten Erscheinung möge zum Schluß noch gedacht werden. Während eines Landregens zeigten Potentialgefälle und Niederschlagslektrizität regelmäßige periodische Schwankungen. Die Periodizität derselben verschwand erst mit dem Nachlassen des Regens. Die beiden Kurven der Niederschlagslektrizität und des Potentialgefälles verliefen so, daß die eine das Spiegelbild der anderen war. Nach der Ansicht der beiden Autoren hat man es hier mit einer Erscheinung zu tun, die mit den Helmholtzschen Wogenwolken zusammenhängt.

4. Die Entstehung der Gewitterelektrizität. Die Versuche D'Alibards und Le Monniers haben zwar die schon lange vermutete elektrische Natur der Blitzentladungen klar gestellt, und sie haben auch gezeigt, daß eine elektrische Differenz zwischen Erdboden und Atmosphäre auch bei heiterem Himmel vorhanden ist, sie konnten aber keinen Aufschluß geben über die Ursache der mit den Gewitterwolken verbundenen oft plötzlich auftretenden gewaltigen Störungen der Potentialdifferenz, welche schließlich in den Blitzentladungen sich ausgleichen. Ein Jahrhundert lang hat man vergeblich mit Eifer nach des Rätsels Lösung gesucht. Nach Dutzenden zählen die Theorien, die zur Erklärung der Gewitterelektrizität aufgestellt wurden¹⁾. Eine wesentliche För-

1) H. Suchsland zählt 24 auf in der Schrift: Die gemeinschaftliche Ursache der elektrischen Meteore und des Hagels. Halle a. S. 1886. Kritik der hauptsächlichsten bei L. Sohncke, Himmel und Erde, 1, 445, 1889 und Gemeinverständliche Vorträge, Jena 1892.

derung unserer Kenntnisse haben erst die letzten Jahrzehnte gebracht. In glücklicher Weise haben dabei die rein meteorologischen und die luftelektrischen Forschungen zusammen gewirkt, die ersteren, indem sie zeigten, daß zwischen den ohne elektrische Entladungen verlaufenden Böen und den Gewittern nur ein gradueller Unterschied besteht, die letzteren, indem sie den Nachweis lieferten, daß Kondensationsvorgänge die Ursache elektrischer Potentialdifferenzen in der Atmosphäre werden können.

Bei der Abkühlung gesättigten Wasserdampfes findet nicht ohne weiteres Kondensation statt. Coulier, Mascart, Aitken haben gezeigt, daß als Kondensationskerne in erster Linie Staubkerne dienen und daß, wenn man solche entfernt, indem man die Luft durch Pfropfen von reiner Watte saugt, beträchtliche Übersättigungen eintreten können. Den theoretischen Grund, für die Erscheinung, der darin liegt, daß die Dampfspannung über konvexen Flächen von kleinem Krümmungsradius bedeutend höher ist als über ebenen, hat Lord Kelvin angegeben.

Beim Fehlen von Staubkernen schlägt sich der Wasserdampf nach Beobachtungen von Wilson¹⁾ auf den negativen Ionen nieder, sobald 4fache Übersättigung vorhanden ist, d. h. wenn die gesättigte Luft adiabatisch auf das 1,25fache ihres ursprünglichen Volumens ausgedehnt wird. Erst bei einer Ausdehnung auf das 1,35fache, d. h. bei 6facher Übersättigung fangen auch die positiven Ionen an als Kondensationskerne zu dienen. Bei noch stärkerer Übersättigung tritt auch in staub- und ionenfreier Luft Kondensation ein.

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich nun für unseren Zweck folgendes: In den unteren und mittleren Schichten der Atmosphäre werden bei nicht zu heftig verlaufender Kondensation in erster Linie Staubteilchen als Kondensationskerne dienen. Diese Staubpartikelchen können, weil sie auch Ionen adsorbieren, teilweise selbst elektrische Ladungen besitzen. Das rasche Verschwinden der negativen Ionen bei der Bildung von Tau und Bodennebeln zeigt, daß sich sehr bald ein Zustand einstellt, bei dem die negativen Ionen entweder selbst als Kondensationskerne dienen oder von den von Staubkernen gebildeten Tröpfchen mit Vorliebe adsorbiert werden. Daß fallende Tropfen hauptsächlich negative Ionen adsorbieren, hat Schmauss²⁾ experimentell gezeigt. Die Ursache

1) C. T. R. Wilson, Proc. Cambridge. Soc. 9, 333, 1897; Philos. Trans. 189, 265, 1897; 192, 403, 1899; 193, 289, 1900.

2) A. Schmauss, Ann. d. Phys. 9, 224, 1902.

der Erscheinung ist die größere Diffusionsgeschwindigkeit der negativen Ionen, welche sie rascher gegen die Oberfläche von Leitern hinwandern läßt als positive. Schwache Regen werden nach dem Gesagten, wie auch die Beobachtung lehrt, hauptsächlich negative Ladungen zur Erde führen. Die angeführten Tatsachen erklären auch, warum auch bei Böen und Gewittern der erste fallende Regen gewöhnlich negativ geladen ist.

Conrad hat gezeigt, daß eine dichte Cumulus-Wolke im Kubikmeter 5 g Wasser enthält. Da an 5 g Regenwasser nach den Messungen von Weiss 5 E. S. E. gebunden sind, nach den Messungen im Ballon und auf Bergen Ladungen von dieser Größenordnung in den höheren Schichten der Atmosphäre schon in Form von leicht beweglichen Ionen vorkommen, viel größere aber sicher an die Molionen gebunden sind, die in erster Linie als Kondensationskerne dienen werden, so würde die beobachtete Ladungsmenge zur Erklärung der Niederschlags Elektrizität selbst dann ausreichen, wenn wir die Annahme machen wollten, daß 1. alles in einem Kubikmeter Atmosphäre kondensierte Wasser als Regen herunterfällt, und daß 2. die Niederschläge während des Fallens keine Ladung mehr aufnehmen, sondern die an den Erdboden gebrachten Ladungen vollständig dem Orte entziehen, an dem die Kondensation stattgefunden hat.

Conrad¹⁾ hat ferner berechnet, inwieweit das elektrische Feld durch nicht geladene Wolken gestört werden kann. Da unter diesen Umständen nur der Unterschied zwischen der Dielektrizitätskonstante der Wolke und der der wolkenfreien Luft in Betracht kommt, so wurde diese Störung als weit unter der Grenze eines meßbaren Betrages gefunden. Nimmt man aber weiter an, das in der Wolke enthaltene Wasser habe pro Gewichtseinheit dieselbe Ladung wie das in den Niederschlägen zur Erde geführte, so bekommt man für die Ladung eines cbm 5 E. S. E. oder $\frac{5}{3} \times 10^{-9}$ Coulomb. Conrad verwendet in seiner Rechnung den nur wenig abweichenden Wert $\frac{5}{3,6} \times 10^{-9}$ Coulomb und berechnet so die Ladung einer Wolke von 1 km Radius zu 5,5 Coulomb. Eine solche Wolke würde, wenn ihr Mittelpunkt 3 km vom Erdboden entfernt wäre, dort ein Potentialgefälle von 11000 Volt/m hervorrufen, ein Wert, der der Größenordnung nach — und diese kann bei den

1) V. Conrad, Wien. Ber. 111, 311, 1902.

rohen Schätzungen über Wolkendurchmesser und Entfernung allein in Betracht kommen — sehr gut mit den beobachteten Werten übereinstimmt. Eine Stratuswolke von 4 km Radius und 0,2 km Höhe würde bei demselben Wassergehalt am Erdboden ein Potentialgefälle von 3000 Volt/m erzeugen.

So weit stimmen Rechnung und Beobachtung gut überein. Die Schwierigkeiten beginnen mit der Frage, wie kommen die großen freien Ladungen der Wolken zustande, wie vollzieht sich die Trennung der beiden Ionenarten? Man wird natürlich antworten, die Ursache dieser Trennung ist die Gravitation, welche die als Kondensationskerne dienenden mit Wasser beladenen Ionen zu Boden sinken läßt, während die Ionen der andern Art durch den aufsteigenden Luftstrom in die Höhe geführt werden oder sich ungefähr in demselben Niveau erhalten. Wenn die Niederschläge ein dem Erdfeld entgegengesetztes Vorzeichen haben, so macht dieses ja auch den Eindruck, als ob die Massen mit dem andern Vorzeichen in der Höhe zurückgeblieben wären. Es können ferner auch von vornherein freie räumliche Ladungen vorhanden gewesen sein. Die Ballonfahrten haben ergeben, daß innerhalb und auch am unteren Rand von Cumuluswolken die von unten her einwandernden negativen Ionen, oberhalb der Wolkenschicht die positiven Ionen überwiegen, eine Trennung ist hier also schon vorhanden. In Stratus- und Cumulostratus-Wolken können sogar Schichten mit positiven und solche mit freien negativen Ladungen innerhalb der Wolkenschicht miteinander abwechseln. Die schwachen Regen, die aus solchen Schichtwolken entstehen, können bald überwiegend positive, bald überwiegend negative Eigenelektrizität zur Erde führen. Zum Teil werden diese Ladungen nicht durch Kondensation des Wassers auf Ionen, sondern durch Absorption von Ionen in den bereits gebildeten Tröpfchen entstehen.

Anders liegt nun die Sache bei allen Wolken, die sich in einem intensiven aufsteigenden Luftstrom bilden, vor allem bei den Böen und Gewittern. An die Erweiterung einer bereits vorher bestanden Schichtung ist hier gar nicht zu denken. Durch die heftige Luftbewegung wird im Gegenteil eine Durchmischung der vorhandenen Schichten herbeigeführt. Zunächst ist schon schwer zu erklären, warum die Kondensation auf den Ionen und nicht auf den Staubteilchen erfolgt, die doch schon bei geringerer Übersättigung als Kondensationskerne wirken. Es tritt ja manchmal der Fall ein, daß die ersten Niederschläge unelektrisch sind, in diesem Falle

haben dann wirklich die Staubteilchen als Kondensationskerne gedient; in der Regel führen aber schon die ersten Tropfen auch bei schwachen Landregen Ladungen zur Erde. Ist die aufsteigende Luftbewegung eine sehr intensive, so kann es vorkommen, daß die Kondensation erst in Höhen eintritt, in denen der Staubgehalt nur noch sehr gering ist, daß die Staubteilchen für die nun sehr stürmisch verlaufende Kondensation nicht mehr genügen. Sind die negativen Ionen als Kerne erschöpft, so müssen bei eintretender 6 facher Übersättigung nun auch die positiven Ionen als Kondensationskerne dienen. Gerdien¹⁾ hat versucht, den Vorgang auch in seinen Einzelheiten zu verfolgen. Er sieht in dem Cirrostratusschirm der Gewitterwolken diejenige Region, in der die Kondensation an den negativen Ionen beginnt; während in den tieferen Schichten nur die Staubteilchen als Kondensationskerne dienen sollen. Solange solche vorhanden sind, muß die Kondensation allmählich, entsprechend der fortschreitenden Abkühlung erfolgen, dagegen wird beim Mangel derselben die Kondensation erst bei 4facher Übersättigung auf den negativen Ionen eintreten, dann aber die ganze seit Überschreitung des Sättigungspunktes überschüssig gewordene Dampfmenge mit einem Schlag ausfallen. Es werden sich so große Tropfen, oder, wenn der Vorgang erst oberhalb der Isotherme für 0° eintritt, Eisnadeln bilden. Damit eine Trennung der negativen Ionen von den positiven erfolgen kann, muß die relative Fallgeschwindigkeit der auf letzteren kondensierten Produkte größer als $dV/dh \times v_+$ sein, wo dV/dh die vertikale Feldkomponente an dem Orte der Trennung, v_+ die spezifische Geschwindigkeit der positiven Ionen daselbst bezeichnet. Die Feldstärke muß natürlich ihrerseits eine Funktion der spezifischen Ionendichte und der Dicke der trennenden Schichten sein. Da uns insbesondere die Konfiguration des entstehenden Feldes ganz unbekannt ist, so glaube ich, daß numerische Angaben ziemlich zwecklos sind. Gerdien kommt auf Grund seiner immerhin ziemlich unsicheren Annahmen zu dem Resultat, daß die Gravitationsenergie unter allen Umständen zur Erzeugung der beobachteten starken Felder ausreicht und daß bei Landregen nur ein kleiner, bei Böen und besonders bei Gewittern ein bedeutend größerer Teil derselben in elektrische Energie umgesetzt wird. Ist die Intensität des aufsteigenden Luftstromes hinreichend stark, um auch die 6 fache

1) H. Gerdien, Phys. Zt. 6, 659, 1905.

Übersättigung herbeizuführen, so wird auch Kondensation an den positiven Ionen eintreten und damit die Konfiguration des Feldes eine recht verwickelte werden. Für den raschen Wechsel in der Eigenladung der Niederschläge fehlt aber noch die Erklärung. Nach den vorstehenden Ausführungen müßten zuerst schwache Niederschläge fallen, die auch nur eine schwache elektrische Ladung mit sich führen, da sie sich auf Staubkerne kondensiert haben, die sich nur durch Ionenabsorption negativ laden konnten; sodann würde großtropfiger negativ geladener Regen und schließlich positiv geladener folgen. Beim Abzug einer Böe wäre zu erwarten, daß das Zeichen des Erdfeldes entgegengesetzt dem der letzten Niederschläge ist. Alles kann eintreten, tritt aber durchaus nicht immer ein. Ferner stimmen mit der Anschauung, daß die Kondensation sprungweise erfolgt, die mit Hilfe von Registrierballons vorgenommenen Temperaturmessungen in den Cumulonimbus und Cirrostratus-Wolken nicht überein. Schwer zu erklären ist ferner auch der Umstand, daß am Erdboden während des Fallens der Niederschläge und ferner innerhalb der im aufsteigenden Luftstrom sich bildenden Wolken gerade ein Überschuß der Ionen der Art beobachtet wird, die als Kondensationskerne dient. Besonders auffallend ist die Tatsache, daß während des Fallens von positiv geladenem Schnee $Q > 1$ wird, also ein Überschuß positiver Ionen vorhanden ist. An die Wirkung eines Lenard-Effektes kann hier nicht gedacht werden.

Elster und Geitel¹⁾ haben gezeigt, daß bei Anwesenheit einer elektrischen Anfangsladung innerhalb oder in der Nähe einer Wolke die hierdurch bewirkte dielektrische Polarisierung der einzelnen Niederschlagsteilchen (Tropfen, Flocken, Eiskörner) zu einer Verstärkung der Anfangsladung durch Selbstinfluenz führen kann, wenn während des Fallens der Niederschläge die größeren mit den kleineren vorübergehend in Berührung kommen. Zum mindesten die Schwankungen in der Stärke der Ladung dürften sich zum Teil durch solche Vorgänge erklären. Die genannten Autoren haben auch eine Wasserinfluenzmaschine konstruiert, welche auf dem hier verwendeten Prinzip der Influenzierung fallender Tropfen beruht.

Um Mißverständnisse, die sich an verschiedenen Stellen in der Literatur eingeschlichen haben, zu verhüten, muß darauf hinge-

1) Elster und Geitel, Wied. Ann. 25, 116 u. 121, 1885.

wiesen werden, daß durch das Zusammenfließen kleiner geladener Tropfen zu einem großen zwar das Potential der entstehenden Tropfen, aber nicht das der Wolke als solcher auf einen außerhalb derselben im Abstand r liegenden Punkt erhöht wird. Dieses = $\Sigma \frac{q}{r}$ wird durch die Vereinigung der Tropfen an sich nicht geändert, muß aber natürlich eine Änderung erfahren, wenn dieses Zusammenfließen Anlaß zu einem rascheren Fallen der Tropfen gibt. Vielleicht hängt damit die bekannte Erscheinung zusammen, daß einem Blitzschlag eine Verstärkung des Regens folgt¹⁾. Auch die hohen von Schneeflocken mitgeführten Ladungen, die oft zu einem schwachen Leuchten der einzelnen Flocken und zu schwachen Blitzentladungen innerhalb der fallenden Schneemassen oder zu Elmsfeuerentladungen zwischen geerdeten Gegenständen und den Schneeflocken führen, lassen sich wohl dadurch erklären, daß jede Flocke aus einer großen Anzahl einzelner Kondensationskerne entstanden ist. Das Aufladen des Elektrometers durch jede einzelne in die Schale fallende Flocke läßt sich bei langsamem Fallen von großflockigem Schnee sehr gut verfolgen.

Ist die Art und Weise, wie die Trennung der Ionen zustande kommt, einmal aufgeklärt, so bietet die Erklärung der zur Erzeugung der Blitze nötigen Potentialdifferenz, wie die oben erwähnten Rechnungen von Conrad zeigen, keine Schwierigkeiten.

Bezüglich der Natur dieser Entladungen muß ich auf die Lehrbücher der Meteorologie und kosmischen Physik verweisen²⁾. Hier möge nur eine Beobachtung Erwähnung finden, die in Beziehung zu den obigen Betrachtungen steht. Man findet in der Literatur Angaben über Blitze, die sich längs der Oberfläche einer Nebelschicht von der Wolke nach dem heiteren Himmel zu entladen. Offenbar hat man es hier mit Entladungen zwischen negativ geladenen Wassertröpfchen und den über der Wolke sich ansammelnden positiven Ionen zu tun.

Als Entladungen zwischen Ionenmassen, die sich an der Grenze von dem Auge nicht wahrnehmbaren Dunstschichten ansammeln, sind auch die Blitze bei heiterem Himmel zu betrachten. Hann³⁾

1) Dagegen nimmt Richarz (Marburger Ber. 1908, 78) auf Grund der Beobachtungen von Barkow und Kießling an, daß die Bildung nitroser Gase durch den Blitz die Ursache der plötzlichen Kondensation ist.

2) Ferner A. Gockel, Das Gewitter. Köln 1905.

3) Hann, Lehrbuch der Meteorologie, S. 486; Handbuch der Klimatologie, 2, 126 u. 261.

macht über diese folgende Angaben: Auf den Llanos von Venezuela beobachtete C. Sachs, daß bei klarem sternenhellem Himmel, der nur am Horizont einen schmalen Kranz weißer Haufenwölkchen aufwies, beständig Flächenblitze aufflammten, und zwar meist in der Nähe des Zeniths, seltener in den tieferen Regionen. Sie verursachten ein starkes gleichmäßiges Aufleuchten einer ziemlich großen Fläche, das meist 1—2 Sekunden anhielt. Von Donner war nicht die geringste Spur zu vernehmen, in tiefstem Schweigen vollzogen sich die Entladungen, welche mitunter in fast ununterbrochener Reihe sich folgten. Der Ort der meisten Blitze war in der Nähe des Zeniths, eine Täuschung darüber war ausgeschlossen. Die Erscheinung wiederholte sich mehrere Nächte hintereinander. Diese Blitze, welche von den Eingeborenen Relámpagos veraneros genannt werden, sollen fast jedes Jahr kurz vor Ende der Trockenheit auftreten, nur selten soll sich ein schwacher Regenschauer dazu gesellen. Auf Madagaskar sollen solche trockene Gewitter mit zahllosen Blitzen in den hohen Wolkenschichten das Ende der Regenzeit bezeichnen. Ähnliche Gewitter, ebenfalls in der Regel ohne Regen, sehr blitzreich und ohne Donner treten auf im Innern von Australien als Ausläufer der tropischen Regen Nordaustraliens.

Bezüglich des Elmsfeuers interessieren uns hier noch die Beobachtungen¹⁾ auf dem Sonnblick, nach welchen dasselbe dort, wie sich an seiner Form leicht erkennen läßt²⁾, positiv ist, solange der Schnee große Flocken bildet, dagegen negativ wird, wenn feinkörniger oder staubförmiger Schnee fällt, ganz entsprechend den Beobachtungen im Tiefland, die im ersten Fall negatives, im zweiten positives Potentialgefälle ergeben.

Das hohe während Gewittern vorhandene Potentialgefälle erklärt auch die Funkenentladungen, die zwischen den Gegenständen, die sich auf das Potential der Atmosphäre laden können, z. B. Telefonleitungen und benachbarten mit der Erde in Verbindung stehenden Körpern erfolgen.

Den normalen Leitungsstrom haben wir oben zu $1,9 \times 10^{-16}$ Amp./qcm bestimmt, dem hundertfachen Betrag des Potentialgefälles und dem etwa doppelten der Leitfähigkeit würden während Gewittern also Leitungsströme von 4×10^{-14} Amp./qcm entsprechen. Bei den stürmischen Luftbewegungen wird auch der nicht durch Niederschläge transportierte Konvektionsstrom relativ hohe Be-

1) Elster und Geitel, Wien. Ber. **101**, 1485, 1892 u. **104**, 42, 1895.

2) A. v. Obermayer, Met. Zt. **5**, 324, 1888.

träge erreichen. Sehr hoch, nämlich von der Größenordnung 10^4 Ampère ist nach Bestimmung von Pockels¹⁾ die Stromstärke in Blitzen.

5. Ströme in vertikalen Leitern. Seit Franklins Dracherversuch hat man sich wiederholt der mit Spitzen versehenen Stangen zum Studium der Lufterlektrizität bedient. Der Tod, den Richmann in Petersburg bei dortigen Versuchen fand, schreckte allerdings für einige Zeit ab, doch hat schon 1775 P. Beccaria²⁾ wieder und zwar als erster über mehrere Jahre sich erstreckende lufterlektrische Beobachtungen mit Hilfe von mit Spitzen versehenen Stangen gemacht. Eines Galvanometers zur Messung des in dem Leiter fließenden Stromes bediente sich zuerst Colladon³⁾. Die Stange, die er auf dem Collège de France aufstellte, hatte eine Länge von 9 m. Sein Galvanometer war offenbar unempfindlich, denn er konnte Strom nur bei Gewittern beobachten. Wohl aus demselben Grunde wie Colladon kam auch Lamont gelegentlich seines Studiums der Erdströme zu dem falschen Resultate: in unseren Breiten strömt in elektrisch ruhigen Perioden weder von der Erde in die Luft noch aus der Luft in die Erde Elektrizität. Die Unrichtigkeit der Folgerung Colladons und Lamonts ist leicht einzusehen. Da das Potential irgend eines Punktes der Atmosphäre stets verschieden ist von dem der Erde, so muß, wenn wir einen Kollektor, der sich auf das Potential der Atmosphäre auflädt, durch einen Leiter mit der Erde verbinden, in diesem ein Strom entstehen. Die Stärke desselben wird allerdings in erster Linie abhängen von der Geschwindigkeit, mit der der Kollektor sich auf das Potential der ihn umgebenden Luft auflädt. Diese Geschwindigkeit ist nach früher (Kap. 2, § 3) Gesagtem bei Spitzen eine ziemlich geringe, woraus sich die negativen Resultate Colladons und Lamonts erklären.

Lemström⁴⁾, der zum Zweck von Studien über die Natur des Polarlichtes die Beobachtungen an vertikalen mit Spitzen versehenen Leitern, nachdem sie fast 25 Jahre geruht hatten, 1882

1) F. Pockels, *Phys. Zt.* **2**, 306, 1901 u. **3**, 22, 1901 u. *Met. Zt.* **18**, 40, 1901.

2) P. Beccaria, *Dell' elettricità terrestre atmosferica a cielo sereno*. Turin 1775.

3) Colladon, *Pogg. Ann.* **8**, 236, 1824 u. *Ann. de chim. et de phys.* **33**, 63.

4) S. Lemström, *Elektrot. Zt.* **4**, 98, 1883 u. *Phys. Zt.* **3**, 306, 1902.

wieder aufnahm, gibt denn auch ganz richtig an, daß der gemessene Strom nur zum Teil ein Naturwert ist und zum Teil instrumentellen Einflüssen, vor allem dem des Spitzenwiderstandes unterworfen ist. Der letztere ändert sich, wie Lemström fand, mit den meteorologischen Faktoren, nämlich mit der Leitfähigkeit der die Spitze umgebenden Luft. Einen hübschen Beweis hierfür konnte Weise ¹⁾ erbringen, indem er auf eine Spitze den Strahl einer Bogenlampe fallen ließ; die Stromstärke in der 24,5 m hohen Leitung stieg dadurch auf das 8fache ihres regelmäßigen Wertes.

Auf Veranlassung der Blitzschutzkommission des Elektrotechnischen Vereins hat dann L. Weber ²⁾ in Breslau und im Riesengebirge in den Jahren 1886—89 eingehende Studien über die Ströme in vertikalen Leitern (Stangen und Drachenschnüren) angestellt. Er erhielt, wie zu erwarten stand, folgende Resultate: die Stromintensität nimmt mit der Höhe des Leiters zu, in vertikalen und schrägen Leitern fließt bei schönem Wetter in der Regel positive Elektrizität von der Atmosphäre nach dem Boden, beim Zustandekommen eines Gewitters und auch beim Vorhandensein dichter Gewitterbewölkung gehen die Ströme auch in entgegengesetzter Richtung; auch bei anderer Wetterlage haben Dichte und Art der Bewölkung einen Einfluß auf die Ströme. Von den Resultaten Weises verdient hier Erwähnung, daß Cirruswolken in einem hohen vertikalen Leiter den stärksten Strom hervorrufen.

In größerem Maßstab beobachtete Lemström die Ströme in Leitern in Sodankylä ³⁾, zum Zweck der Erforschung der Natur des Polarlichtes. Die von ihm als Ausströmungsapparat (appareil d'écoulement) bezeichnete Einrichtung bestand aus einem Drahtnetze von 900 qm Oberfläche, dessen einzelne Maschen 1 qm Fläche hatten. Das Netz wurde gebildet aus 2 mm starkem blankem Kupferdraht, der im Abstand von je 50 cm mit Messingspitzen versehen war. Das Ganze befand sich auf der Spitze eines Hügels 580 m über dem Meer und wurde getragen von 2½ m hohen, mit Porzellanisolatoren versehenen Pfählen. Eine ebenfalls isolierte Drahtleitung führte zu dem am Fuß des Hügels aufgestellten

1) G. Weise, Atmosphärisch-elektrische Ströme in vertikalen Leitern. Rostocker Inaugural-Dissertation. Sternberg 1904.

2) L. Weber, Elektrot. Zt. **6**, 306, 1885, **7**, 445, 1886, **9**, 189, 1888, **10**, 387, 521, 571, 1889.

3) Expédition Finlandaise etc.

Galvanometer und von da zu einer Erdplatte. Der durch diese Vorrichtung von der Atmosphäre zur Erde fließende Strom war stark genug, um in der Nacht ein Leuchten über dem Hügel hervorzurufen, das auf 4 km Entfernung sehr gut wahrnehmbar war. Die Farbe des Lichtes war gelb-grün, dementsprechend das Spektrum ein kontinuierliches, von *D* bis *F* gehendes, in dem die Polarlichtlinie stark hervortrat. Wir werden später auf diese Versuche zurückkommen.

Von den Resultaten der Messungen, die an einfachen Spitzen angestellt wurden, erscheint mir bemerkenswert, daß der Vertikalstrom in dem auf einer ausgedehnten Ebene gelegenen Sodankylä viel mehr Schwankungen aufwies, als auf der zirka 115 km nördlich am Abhang einer Schlucht gelegenen Station Kultala. Da die meteorologischen Bedingungen an beiden Orten dieselben sind, so scheint mir, daß hier ein Einfluß des Untergrundes zum Ausdruck kommt.

6. Elektrische Ströme und Erdmagnetismus. Daß ein Zusammenhang zwischen den Erscheinungen des Erdmagnetismus und den elektrischen Strömen in der Atmosphäre vorhanden sein muß, hat zuerst Schuster ¹⁾ betont. Er geht von der Erwägung aus, daß in einem Leiter, der durch die Kraftlinien eines magnetischen Feldes bewegt wird, ein elektrischer Strom entstehen muß. Als Leiter zog Schuster nur die höchsten Schichten der Atmosphäre in Betracht, denen er auf Grund der Polarlichterscheinung ein Leitvermögen zuschrieb.

In einer neueren Arbeit ²⁾ berechnet er unter der Annahme, daß die beobachteten Schwankungen der magnetischen Elemente vollständig verursacht sind durch elektrische Ströme, diese letzteren und damit die periodischen Ortsveränderungen der leitenden Luftschichten, welche nötig sind, um die beobachteten Oszillationen magnetischer Elemente zu erzeugen. Auf diese Weise kommt Schuster zu dem Resultat, daß die Periode der täglichen Luftdruckschwankung in innigem Zusammenhang steht mit der der magnetischen Elemente. Da nämlich die Maxima und Minima der beiden täglichen Luftdruckwellen mit der Sonne über die Erde wegziehen, so müssen diese Luftdruckschwankungen auch

1) A. Schuster, Proc. Roy. Soc. **42**, 373, 1887.

2) A. Schuster, Soc. franç. de physique, 1907, 3, 271; Journal de physique, **6**, 937, 1907.

Veranlassung zu einer horizontalen Luftbewegung geben. Hierdurch werden unter dem Einfluß der Vertikalkomponente des erdmagnetischen Feldes Ströme erzeugt, die Schuster zu berechnen sucht, unter der Annahme, daß die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre 1. mit der Höhe wächst und daß dieselbe 2. innerhalb einer Schicht von demselben Radius zunimmt, mit dem Winkel, unter dem die Sonnenstrahlen auftreffen. Aus diesen Strömen lassen sich dann weiter, wie dieses auch schon von andern angegeben wurde, die magnetischen Schwankungen berechnen. Und zwar sind die berechneten Werte von Phase und Amplitude der beiden magnetischen Wellen, der ganztägigen und halbtägigen, in guter Übereinstimmung mit den beobachteten. Allerdings ist hier eine mittlere Leitfähigkeit der Atmosphäre vorausgesetzt, die 10^{11} mal größer ist als die am Erdboden beobachtete, doch weist Schuster darauf hin, daß in den höchsten Schichten der Atmosphäre dieselbe auch wirklich bedeutend größer sein muß (vergl. S. 61), als in den unteren. Wenn man nur die Zunahme der Beweglichkeit mit der Abnahme des Luftdruckes in Betracht zieht, so erhält man bei einem Luftdruck von 0,001 mm Quecksilber schon eine Leitfähigkeit die 10^6 mal größer ist, als in der Nähe des Bodens. Hierzu tritt dann noch als weitere Ursache der Erhöhung der Leitfähigkeit die Ionisation durch die ultraviolette Sonnenstrahlung, der Schuster Rechnung trägt, indem er die Leitfähigkeit als Funktion des Sonnenstandes betrachtet.

Aus der verhältnismäßig geringen Leitfähigkeit der tieferen Schichten der Atmosphäre zieht dann Schuster den weiteren Schluß, daß ein Zusammenhang zwischen den in diesen Schichten vorgehenden Änderungen elektrostatischer Natur und den Schwankungen der magnetischen Elemente nicht existiert. Er weist darauf hin, daß Blitzenladungen keine Einwirkung auf die magnetischen Instrumente haben und daß umgekehrt die sogenannten magnetischen Gewitter das Potentialgefälle nicht beeinflussen. Indessen hat Zölss¹⁾ gefunden, daß elektrische Zerstreuung und die Amplitude der täglichen Deklinationsschwankungen parallel gehen. Je größer die Zerstreuung, desto größer ist im Mittel auch die tägliche Amplitude der Deklination. Die jährlichen Schwankungen der beiden Elemente sind dieselben, und selbst ihre täglichen Perioden zeigen nicht geringe Ähnlichkeit. Ein direkter Zusammenhang zwischen

1) P. B. Zölss, Wien. Ber. **113**, 112, 1903.

den beiden Elementen könnte nur dann angenommen werden, wenn man im Gegensatz zu Bezold und Schuster die Deklinationsschwankungen als durch Vertikalströme veranlaßt, ansieht. Wahrscheinlicher und mit der Schusterschen Theorie gut übereinstimmend ist die Annahme, daß sowohl Zerstreung als auch Amplitude der Deklinationsschwankungen mit der Sonnenstrahlung gleichzeitig wachsen, die erstere infolge der Absorption der Strahlen in den unteren, die letztere infolge derselben Absorption in den obersten Schichten der Atmosphäre.

Unter den vielen Dingen, die man mit den Sonnenflecken in Verbindung gebracht hat, sind sicherlich die Schwankungen der magnetischen Elemente diejenigen, bei welchen dieser Zusammenhang am sichersten nachgewiesen ist. Nicht nur sind in den sonnenfleckreichen Jahren die periodischen und unperiodischen magnetischen Schwankungen in ihrer Gesamtsumme am intensivsten, sondern es hat sich auch in einzelnen Fällen ergeben, daß mit auffallender Veränderung an Flecken Änderungen aller drei Elemente des Erdmagnetismus zeitlich zusammenfielen. Ebenso existiert eine gut ausgeprägte 26 tägige Periode dieser Elemente. Auch nimmt in den mittleren Breiten die Zahl der Polarlichter mit der Fleckentätigkeit der Sonne zu, während in den Polargegenden ein solcher Zusammenhang nicht existiert. Auch dieser Zusammenhang zwischen der Größe der Amplitude der magnetischen Schwankungen und den Sonnenflecken würde sich nach der hier entwickelten Theorie leicht erklären, wenn man nur, was auch aus anderen Gründen sehr wahrscheinlich ist, annimmt, daß mit der Fleckentätigkeit die Strahlung und damit die Leitfähigkeit der obersten Luftschichten zunimmt. Wenn die Bewegungen der Atmosphäre die regelmäßigen Schwankungen der magnetischen Elemente hervorrufen, so müssen die magnetischen Gewitter durch plötzliche Änderungen der Leitfähigkeit veranlaßt sein. Daß solche am häufigsten in den Jahren starker Fleckentätigkeit auftreten, ist sehr wahrscheinlich.

Die Sache würde sich nicht viel anders darstellen, wenn man mit Arrhenius annähme, daß die Leitfähigkeit der obersten Luftschichten verursacht wird durch von der Sonne ausgehende Elektronen. Indessen ist die Existenz einer solchen Ionenstrahlung rein hypothetisch, während die der ultravioletten Strahlung experimentell nachweisbar ist.

Auch der normale Vertikalstrom Luft-Erde muß sich, worauf

zuerst Elster und Geitel¹⁾ hingewiesen haben, durch magnetische Beobachtungen nachweisen lassen. Aus dem Linienintegral der Horizontalintensität des magnetischen Feldes längs einer geschlossenen Kurve läßt sich nämlich der Vertikalstrom über der von der Kurve umschlossenen Fläche berechnen. Derartige magnetische Messungen würden in sehr wünschenswerter Weise die elektrischen ergänzen, insofern sie die aus Einzelmessungen schwer zu bestimmende Gesamtsumme der über einer bestimmten Fläche in der Richtung der Vertikalen wandernden Elektrizitätsmenge ergäben. Es würde sich dann in einfacher Weise feststellen lassen, in welchem Gebiete positive, in welchem negative Elektrizität im Überschuß von der Atmosphäre zur Erde wandert.

7. Ströme in den höchsten Schichten der Atmosphäre. Polarlichter. Bezüglich der Beschreibung der Polarlichter muß ich auf die Lehrbücher der kosmischen Physik und die Spezialliteratur verweisen. Hier können nur die Beziehungen zu den elektrischen Strömen behandelt werden.

Wir finden manchmal in meteorologischen Werken die Angabe, daß die Polarlichter Seitenstücke zu den Gewittern bilden, insofern als in der gut leitenden Atmosphäre der arktischen Regionen diese stillen Entladungen an die Stelle der Funkenentladungen der Blitze treten. Dieser Schluß ist aber durchaus nicht einwandfrei. In den Polargegenden fehlen die Gewitter nicht deshalb, weil die Luft gut ionisiert ist, sondern weil die Veranlassung zur Bildung eines aufsteigenden Stromes von mit Feuchtigkeit gesättigter Luft fehlt. Die Polarlichter treten vorzugsweise in einer bestimmten Zone auf, sie sind selten in den niederen Breiten, wo die Gewitter häufig sind und in den höchsten, wo es keine Gewitter gibt.

Die schon 1741 gemachte Beobachtung, daß das Erscheinen der Polarlichter mit Bewegungen der Magnetnadel verbunden ist, ließ sich, nachdem Oerstedt die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom entdeckt hatte, am einfachsten durch die Annahme erklären, daß wir auch im Polarlicht elektrische Ströme vor uns haben. Die Magnetnadel wurde nach Osten abgelenkt, wenn die Lichterscheinung nördlich, nach Westen, wenn sie südlich vom Beobachter stand; und Paulsens Begleiter Vedel machte in Godthaab auf Grönland die Wahrnehmung, daß der Sinn der Ablenkung der Nadel sich änderte in dem Augenblick, in dem die Nordlichtstrahlen, die dort

1) J. Elster und H. Geitel, Terr. Magn. 3, 49, 1898.

ebenso wie die Inklinationsnadel senkrecht zur Erdoberfläche stehen, den Zenith des Beobachters passierten. Der hieraus gezogene Schluß, daß in den Lichtstrahlen positive Elektrizität von unten nach oben strömt, mit dem auch die manchmal gemachte Beobachtung harmonierte, daß während des Auftretens der Polarlichter das Potentialgefälle sich verringerte oder gar negativ wurde, mußte erschüttert werden, als sich herausstellte, daß die Nadel häufig ruhig blieb, während Polarlichter in nächster Nähe auftraten. Wiederholt wurde auch bemerkt, daß die magnetischen Störungen der stärksten Entfaltung des Polarlichtes um mehrere Stunden vorangingen.

Diese Beobachtung im Verein mit der starken Veränderlichkeit der Lichterscheinung — die Strahlen schießen in wenigen Sekunden über den größten Teil des sichtbaren Himmels empor, um ebenso rasch wieder andere Formen anzunehmen — führten Paulsen ¹⁾ zu dem Schluß, daß die Lichtstrahlen Kathodenstrahlen sind, die erzeugt werden durch elektrische Ströme innerhalb der Atmosphäre. Diese Ansicht ist jetzt die herrschende geworden. Birkeland ²⁾ hat experimentell gezeigt, daß der Weg der Kathodenstrahlen in dem magnetischen Feld einer Kugel übereinstimmt mit dem Gang der Nordlichtstrahlen. Theoretisch haben ferner den Weg, den Kathodenstrahlen im magnetischen Erdfeld einschlagen müssen, Störmer ³⁾ und Villard ⁴⁾ behandelt.

Die Schwierigkeit liegt nur in der Erklärung der Ursache der Ströme, welche diese Kathodenstrahlen hervorrufen. Villard begnügt sich, mathematisch den Weg, den Kathodenstrahlen im magnetischen Erdfeld zurücklegen, zu entwickeln, und läßt die Frage nach der Kraft, welche die Strahlen erzeugt, offen. Nur beispielshalber verweist er darauf, daß negativ geladene Cirruswolken unter der Einwirkung des ultravioletten Lichtes solche Strahlen erzeugen können. Tatsächlich hat Lenard gezeigt, daß

1) A. Paulsen, *Met. Zt.* **11**, 454, 1894 u. *Oversigt von det Kon. Danske videnskabernes selskabs forhandlingene*, 1906, Nr. 2, S. 144; *Auszug Met. Zt.* **18**, 414, 1901.

2) Kr. Birkeland, *Expedition Norvégienne 1899—1900 pour l'étude des aurores boréales*. Christiania 1901.

3) K. Störmer, *C. R.* **142**, 1580, **143**, 11, 140, 408, 460; *Archives de Genève* **112**, 221, 1907.

4) P. Villard, *C. R.* **142**, 1330, 1906, **143**, 587, 1906; *Journ. de phys.* **7**, 429, 1908.

Kathodenstrahlen bei der Bestrahlung verschiedener negativ geladener Körper durch ultraviolettes Licht entstehen. Auch kosmischer Staub, der in unsere Atmosphäre eindringt, könnte nach Villard denselben Effekt hervorbringen. Schließlich denkt er an Hertzsche Wellen, die von der Sonne ausgehen und Entladungen in unserer Atmosphäre hervorbringen, ähnlich denen, die man in elektrodenlosen luftleer gemachten Röhren erhält. Auch Paulsen nimmt an, daß die Kathodenstrahlen in unserer Atmosphäre entstehen und zwar infolge Anhäufung negativer Ionen in den höchsten Schichten derselben. Einen ähnlichen Standpunkt nimmt Arrhenius¹⁾ ein, der von der Sonne infolge des Strahlungsdruckes negativ elektrisierte Teilchen ausgehen läßt, welche in den höchsten Schichten unserer Atmosphäre stecken bleiben und dort sich entladen. Birkeland und Störmer lassen dagegen die Kathodenstrahlen, welche das Polarlicht erzeugen, direkt von der Sonne ausgehen. Einig sind alle die genannten Forscher darin, daß die höchsten Schichten der Atmosphäre stark ionisiert sind.

Die Folgerung aus der Theorie Paulsens und der von Arrhenius, daß das Auftreten von Polarlichtern mit einer Verminderung des positiven Potentialgefälles verbunden ist, hat, wie schon bemerkt, Paulsen selbst bestätigt gefunden. Zu demselben Resultat kam die schwedische Polarexpedition am Kap Thordsen. An anderen allerdings weniger nördlich gelegenen Orten ergab sich aber diese Beziehung nicht. Zieht man auch Melbourne und Ithaka N. Y. als außerhalb der Maximalzone der Polarlichter gelegen nicht in Betracht, so bleibt immerhin das Resultat, daß Simpson in Karasjok nicht den geringsten Einfluß der Nordlichter auf das Potentialgefälle oder die Ionisation finden konnte, ebensowenig läßt sich ein solcher aus den in extenso wiedergegebenen Beobachtungen von Lemström in Sodankylä nachweisen. Auch der mittels des Spitzenapparates gemessene Vertikalstrom scheint von den Nordlichtern nicht berührt worden zu sein.

1) S. Arrhenius, Phys. Zt. **2**, 81, 1901; Astrophys. Journ. **13**, 344, 1901.