

Deutsches Reich
Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe)

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band VIII

Nr. 4

Die elektrischen Erscheinungen des Gewitters

Versuch einer kritischen Entscheidung zwischen den einzelnen Gewittertheorien

von

Hans Israël

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Deutsches Reich
Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe)

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band VIII

Nr. 4

Die elektrischen Erscheinungen des Gewitters

Versuch einer kritischen Entscheidung zwischen den einzelnen Gewittertheorien

von

Hans Israël

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01902-3 ISBN 978-3-662-02197-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02197-2

Inhalt.

| | Seite |
|---|-------|
| I. Allgemeines | 3 |
| II. Die Elektrizitätsentstehung im Gewitter als Influenzvorgang | 4 |
| III. Die „Wasserfalltheorie“ des Gewitters | 13 |
| IV. Kritische Prüfung der Gewittertheorien auf Grund von Beobachtungen am Boden | 34 |
| V. Der elektrische Aufbau von Gewitterwolken nach direkten Messungen in der freien Atmosphäre | 41 |
| Zwischenkapitel (zu III): Die Entstehung des Blitzes | 19 |

I. Allgemeines.

Das Gewitter gehört fraglos zu den imposantesten und gleichzeitig in seinen Auswirkungen gefährlichsten häufigeren Naturerscheinungen. Eine Sonderstellung unter all den alltäglich gewohnten Witterungsgeschehnissen erhält es dadurch, daß bei ihm die normalerweise nicht beachtete und auch in nichts sonst in Erscheinung tretende elektrische Energie in der Atmosphäre sichtbar und gleichzeitig in Zusammenballungen ungeheuren Ausmaßes zum Umsatz gelangt. Beides, die auffallenden Begleiterscheinungen des Gewitters wie deren Gefahrenquelle, haben schon frühzeitig in der Entwicklung der modernen Naturwissenschaften zur beobachtenden Erforschung seiner Gesetze und kausalen Zusammenhänge wie zur Ersinnung und technischen Vervollkommnung von Schutz- und Gegenmaßnahmen angeregt bzw. gezwungen.

Überblickt man heute rückschauend die Entwicklung der Gewitterforschung, so erkennt man hier wie auf manchem anderen Teilgebiet der atmosphärischen Physik die naheliegende Tendenz, das Geschehen zunächst weitestgehend durch zweidimensionale Betrachtung, d. h. allein durch Beobachtung, Messung und Beurteilung vom Boden aus, zu erfassen und den Schluß auf den Ablauf im dreidimensionalen Raum durch theoretische Spekulation zu gewinnen. Die verschiedenen Gewittertheorien knüpfen an Bodenbeobachtungen über Niederschlags Elektrizität, elektrisches Feld u. a. an; ebenso konnten auch bis vor kurzem lediglich aus Bodenmessungen verschiedenster Art Kriterien für das Zutreffen des einen oder anderen Gewittermodells abgeleitet werden.

Da, wie im weiteren näher ausgeführt wird, die Ausdeutung des elektrischen Gewittergeschehens am Boden bezüglich seiner in der freien Atmosphäre liegenden Ursachen mehrdeutig ist, kann es nicht überraschen, daß gerade die auffallendste Erscheinung im ganzen meteorologischen Geschehen heute noch beinahe zu den rätselhaftesten gehört — mindestens soweit es ihre tieferen Ursachen angeht. Eindeutige Entscheidungen und damit klare Einsicht in diese Vorgänge sind ebenso wie bei anderen meteorologischen Problemen erst von einer systematischen Erweiterung der Beobachtung und Messung ins Dreidimensionale zu erhoffen.

Die technische Schwierigkeit und vor allem Gefährlichkeit dieser Art Untersuchungen, die den direkten Vorstoß mit bemanntem Luftfahrzeug in die freie Gewitteratmosphäre praktisch ausschließt, erklärt es, daß trotz der schon lange erkannten Unmöglichkeit, durch Bodenbeobachtungen allein zum Ziele zu kommen, erst vor 3 Jahren die ersten direkten Messungen im Gewitterzentrum selbst bekannt geworden sind¹⁾. Es ist zu vermuten und zu hoffen, daß diese Untersuchungen, die trotz ihres zunächst nur qualitativen Charakters bereits überraschende Ergebnisse zeitigten (s. Abschn. V), den Auftakt darstellen zu einer neuen Periode der Gewitterforschung — und, wie schon an anderer Stelle kürzlich ausgesprochen²⁾, der luftelektrischen Arbeit überhaupt.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß praktische Aufgaben, die von außen her an die Wissenschaft herantreten, ihr häufig zu einer wesentlichen Erweiterung ihrer Basis, ihrer Ziele und ihrer Erfolge verhelfen können. Auch diese Linie läßt sich in der Gewitterforschung erkennen: Der Blitzableiter in seinen verschiedenen Variationen, der für die Räume des menschlichen Lebens am Boden schon seit langem eine fast 100proz. Sicherheit vor den Gefahren des Gewitters bietet, erwies sich schon in der Entwicklung der elektrischen Energieübertragung mittels Freileitungen als nicht mehr zureichend. Ein großer Teil der Gewitterarbeiten der letzten 15 Jahre mit teilweise grundsätzlichen Erweiterungen der bis dahin vorhandenen

¹⁾ G. C. Simpson und F. I. Scrase: Proc. Roy. Soc. (A) **161**, 309—352, 1937.

²⁾ H. Israël: Wiss. Abh. des RfW. Bd. V, Nr. 12, 26 S., 1939.

Kenntnisse entstammen der Hochspannungstechnik und ihren Blitzschutzproblemen (M. Toepler, A. Matthias, H. Norinder u. a.); auch hier genügte indes der Aufgabenstellung nach noch die Beschränkung auf Untersuchungen vom Boden aus.

Gänzlich neue Aufgaben sind im Zuge der Luftfahrtentwicklung für die Lufterlektrizität und speziell die Gewitterforschung entstanden, Aufgaben, die dringend nach dreidimensionaler Kenntnis des elektrisch-atmosphärischen Geschehens verlangen. Sei es, daß man zunächst nur die Geschehnisse und ihren räumlichen und zeitlichen Ablauf sicher zu kennen wünscht, sei es, daß man die Erfindung wirksamer Schutzmaßnahmen für fliegende Objekte — frei oder gefesselt — anstrebt, beides stellt der Forschung die Aufgabe häufigen, möglichst regelmäßigen Vorstoßes mit Meßgeräten in den freien Gewitterraum.

Sieht man von diesem weiter gespannten Rahmen der zukünftigen Gewitterforschung zunächst ab, so liegen heute die vordringlichsten praktischen Aufgaben in der nach dem jetzigen Stand der Kenntnisse möglichen Abschätzung des Gefahrenumfanges und in der Warnung luftfahrtechnischer Anlagen und Einrichtungen in örtlicher und zeitlicher Beziehung — je nach dem, ob sie frei fliegen oder bodenständig gefesselt sind. Um die hierfür sich bietenden Möglichkeiten übersehen zu können, sind in der vorliegenden Arbeit die zur Diskussion stehenden Gewittertheorien in prinzipieller Gestalt und mit überschlagsmäßiger Berechnung der Energieumsätze ausführlich nebeneinandergestellt. Im Anschluß hieran wird an Hand des vorliegenden Beobachtungsmaterials eine kritische Entscheidung dafür angestrebt, welcher der entwickelten Vorstellungen der Vorrang gebührt. Im letzten Abschnitt werden die direkten Aufstiege in Gewitterwolken von G. S. Simpson und F. J. Scrase mit ihren Konsequenzen im einzelnen besprochen.

Die zahlreichen Versuche zur Erklärung der starken Elektrizitätsentwicklung im Gewitter sind durch die grundsätzliche Erkenntnis, daß diese in engem Kausalzusammenhang mit der Bildung und der Bewegung von Niederschlagsteilchen steht, auf einige wenige ernsthaft diskutabile „Gewittertheorien“ beschränkt worden. Es kann hier nicht der Zweck sein, auf alle diese Erklärungsversuche und ihre „Gegenanzeigen“ einzugehen, da dies den Umfang und das Ziel des vorliegenden Berichtes weit überschreiten würde. Im folgenden sollen lediglich die beiden grundsätzlich verschiedenen Gewittermodelle, die in ihren Grundlagen auf den Arbeiten von J. Elster und H. Geitel bzw. F. Lenard fußen und von C. T. R. Wilson bzw. G. C. Simpson entwickelt worden sind, im einzelnen behandelt und kritisch diskutiert werden, da sie allein nach den heutigen Kenntnissen über das Gewitter geeignet erscheinen, wirklich brauchbare Vorstellungen von dessen Elektrizitätsentstehung zu vermitteln.

II. Die Elektrizitätsentstehung im Gewitter als Influenzvorgang.

1. Influenztheorien der Niederschlags- und Gewitterelektrisierung nach J. Elster und H. Geitel¹⁾.

Der erste Versuch, das Gewitter als eine Art atmosphärischer Influenzmaschine anzusehen, stammt von J. Elster und H. Geitel. Ausgangspunkt der Überlegungen ist die bekannte Thomsonsche Wasserinfluenzmaschine, deren Wirksamkeit die genannten Verfasser in der folgenden dem Aufladungsprozeß in den Wolken angenäherten Weise beschreiben: Aus einem in eine Spitze auslaufenden isolierten Gefäß tropft Wasser durch ein unmittelbar darunter isoliert aufgestelltes Rohr ab, ohne dessen Wandung zu berühren. Wird diesem Rohr jetzt eine positive Ladung erteilt, so führen die fallenden Tropfen negative Ladung vom Gefäß fort, bis dieses eine den Influenzgesetzen entsprechende wahre positive Ladung angenommen hat. Werden jetzt Gefäß und Rohr durch Ineinanderschieben so verbunden, daß die Gefäßladung ganz oder zum größten Teil auf den Rohrmantel übergeht, so erhöht sich dessen positive Ladung um einen merklichen Betrag. Durch Trennen erneute Aufladung und Wiederverbinden der beiden Apparateile läßt sich auf diese Weise die Ladung des Rohres an und für sich beliebig steigern.

Überträgt man diesen Mechanismus auf die Atmosphäre, so ist zunächst die Existenz eines elektrischen Feldes in den Wolken notwendige Voraussetzung. Der Vorgang der eigentlichen Ladungstrennung und Anhäufung, der im obigen Versuch außer dem Tropfenfall die Überführung der im Gefäß zurückbleibenden Ladung auf das Rohr durch leitende Verbindung zwischen beiden voraussetzt, verläuft hier naturgemäß anders: Sobald die Wolke zu regnen beginnt, setzt in jedem fallenden Tropfen der Feldrichtung entsprechend Ladungstrennung ein: im normalen nach oben positiven Feld trägt die Oberseite des Tropfens negative, die Unterseite positive Oberflächenladung. Auf seinem Fall wird nun der Tropfen mit kleineren, langsamer fallenden Tröpfchen und mit Wolkenelementen zusammenstoßen und dabei — falls es nicht zum Zusammen-

¹⁾ J. Elster und H. Geitel: Wied. Ann. d. Phys. **25**, 116—131, 1885; Phys. Zeitschr. **14**, 1287—1292, 1913; H. Geitel: Phys. Zeitschr. **17**, 455—464, 1916.

fließen kommt¹⁾ — mit diesen in Ladungsaustausch treten²⁾. Stößt z. B. ein Tropfen gemäß Abb. 1 links mit einem kleineren zusammen, so wird dieser, falls kein Zusammenfließen stattfindet, den Stromlinien entsprechend um den größeren Tropfen herumgeführt, um ihn an seiner Oberseite negativ geladen zu verlassen. Fließen beide Tropfen zusammen, so ändert sich an der Ladungsverteilung praktisch nichts, da nur der ursprüngliche große Tropfen um einen geringen Betrag wächst — also nur die Dichte seiner Oberflächenladung etwas vermindert — ohne daß er wahre Ladung aufnimmt oder abgibt.

Diese Ladungstrennung durch Berührung und Wiedertrennung verschieden großer Tropfen gemäß der in Abb. 1 links skizzierten Weise bietet nun allerdings bei der Erklärung der Gewitterelektrisierung Schwierigkeiten insofern, als diese Art räumlicher Ladungstrennung feldschwächend wirkt und gewisse Zusatzannahmen über die Konvektionsströme in den Wolken notwendig macht, durch die die elektrisierten Wolken schichten so umgelagert werden, daß sie wieder feldverstärkend wirken können. Ein näheres Eingehen hierauf erübrigt sich, da die Vorstellung dieser Art der Ladungsbildung aus anderen Gründen bald von J. Elster und H. Geitel verlassen wurden. Das Herumgleiten des kleineren Tropfens um den größeren setzt nämlich voraus,

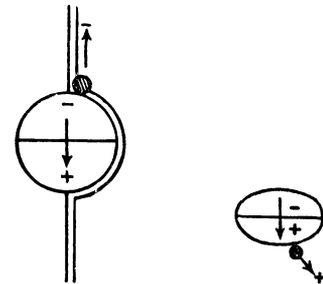


Abb. 1. Ladungstrennung durch Tropfenzusammenstoß nach J. Elster und H. Geitel. Links (rechts) nach der ersten (zweiten) Theorie.

Wie P. Lenard bei seinen Untersuchungen über die Deformation von Tropfen in einem aufwärtsgerichteten Luftstrom nachwies³⁾, ist dies mit zunehmender Tropfengröße immer weniger der Fall: Die Tropfen zeigen immer stärkere Abplattung in Fallrichtung. Trifft ein solcher deformierter Tropfen bei seinem Fall auf einen kleineren, so wird dieser (Abb. 1 rechts), falls keine Vereinigung stattfindet, nicht mehr um den größeren herumgleiten können, sondern vielmehr schon an dessen Unterseite reflektiert werden; er wird also mit anderen Worten im vorliegenden Fall positiven Potentialgefälles den größeren positiv geladen verlassen. Dieser Prozeß wirkt, wie man sofort sieht, feldverstärkend, bietet also jetzt keine Schwierigkeiten mehr bezüglich der Ladungssteigerung bis zur Blitzentladung, wie folgende Überschlagsrechnung zeigt: „Eine in einem homogenen Felde von der Intensität F und mit horizontalen Niveauflächen schwebende leitende Kugel polarisiert sich so, daß, unabhängig von ihrem Radius, die elektrische Dichtigkeit in ihrem höchsten und tiefsten Punkte $\sigma = \frac{3F}{4\pi}$ ist. Eine sehr kleine Kugel, deren Radius ρ im Verhältnis zu dem der größeren unendlich klein angenommen werden möge, würde, wenn sie diese gerade in dem tiefsten Punkte berührt, beim Zurückprallen eine Ladung mitnehmen, deren mittlere Dichte auf ihr das $\frac{\pi^2}{6}$ -fache der Dichtigkeit σ an der berührten Stelle wäre, indem die Umgebung der getroffenen Stelle als eben angesehen wird. Die somit von der kleinen Kugel aufgenommene Elektrizitätsmenge würde sich als

$$E = \frac{\pi^2}{6} \cdot \frac{3F}{4\pi} 4\pi\rho^2 = \frac{\pi^2}{2} \rho^2 F$$

berechnen.

Nehmen wir nun an, das Material der kleinen Kügelchen sei Wasser oder Eis, so wird das Gewicht eines einzelnen $\frac{4\pi\rho^3}{3}$ Gramm betragen oder es werden $\frac{3}{4\pi\rho}$ solcher Kügelchen erforderlich sein, um ein Gramm Wasser zu bilden. Falls nun alle diese Kügelchen eine wirksame Begegnung mit den großen Kugeln gehabt haben (was bei dem Falle von Niederschlägen durch eine Wolke allerdings schwerlich zutreffen wird), so würde die auf ihnen vorhandene Elektrizitätsmenge

$$Q = \frac{3}{4\pi\rho^3} \cdot E = \frac{3\pi}{8\rho} F$$

elektrostat. Einheiten betragen.

Setzen wir beispielsweise den Radius der Kügelchen, wie es bei Wolkenelementen vorkommt, $0,001 \text{ cm}^4$), nehmen wir ferner die Feldstärke zu

$$100 \frac{\text{Volt}}{\text{Meter}} = \frac{1 \text{ Volt}}{\text{cm}} = \frac{1 \text{ Ves}}{300 \text{ cm}}$$

¹⁾ Daß dies nicht nur möglich, sondern sogar häufig der Fall ist, lehrt außer entsprechenden Versuchen die tägliche Erfahrung, daß beim Auftreffen von Wassertropfen oder -strahlen auf eine Wasseroberfläche eine große Zahl feiner auf der Wasseroberfläche tanzender und entlangrollender Tröpfchen erzeugt wird — man denke etwa an das vom Ruderblatt abtropfende Wasser — die erst nach einiger Zeit in die Oberfläche einmünden.

²⁾ Daß feine Wassertröpfchen mit einer größeren Wasseroberfläche tatsächlich in leitende Verbindung kommen können, ohne mit dieser zusammenzufließen, läßt sich durch direkten Versuch nachweisen (J. Elster und H. Geitel, a. a. O.).

³⁾ P. Lenard: Met. Zeitschr. 21, 249—262, 1904.

⁴⁾ V. Conrad: Met. Zeitschr. 24, 159—166, 1907.

elektrost. Einheiten an, so ergibt sich als die Gesamtladung von einem Gramm Wasser innerhalb der angenommenen Wolke feinsten Wasserstaubs

$$\frac{3\pi}{8} \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{300} = \frac{5\pi}{4}$$

elektrost. Einheiten, d. h. zu ungefähr 4 elektrost. Einheiten. Da eine Wolke in Wirklichkeit bis zu 5 Gramm an Wassertröpfchen im Kubikmeter enthält, so käme unter den angenommenen Voraussetzungen auf diesen Raum eine Gesamtladung von 20 elektrost. Einheiten (6 Coulomb/km³).

Für den Fall, daß die Berührung und Trennung der Niederschlagsteilchen nicht gerade im tiefsten Punkte des größeren stattfindet, tritt zu der fortgeführten Elektrizitätsmenge als Faktor noch der Cos des Winkels hinzu, dessen Standbogen der Abstand des getroffenen Punktes von der tiefsten Stelle ist. Für Winkel bis zu 60°, d. h. für Berührungspunkte, die $\frac{3}{4}$ des ganzen Querschnitts des fallenden Tropfens ausfüllen, würde also der berechnete Betrag noch nicht um die Hälfte herabgesetzt.

Die Feldverstärkung durch den betrachteten Prozeß ist noch nicht mit in Anschlag gebracht; es genügt der Hinweis, daß sie selbsttätig erfolgt und das die freiwerdenden Influenzladungen immer der jeweiligen Feldstärke proportional sind.“

Ergänzend ist noch zu erwähnen, daß diese Art der Ladungstrennung selbstverständlich auch bei Niederschlagsteilchen in fester Form (Graupel, Hagel, Schnee) möglich und in ihrer Gesamtwirksamkeit wahrscheinlich sogar noch größer ist, da bei diesen ein Zusammenfließen ausschaltet. Vorauszusetzen ist dabei nur, daß diese Partikelchen noch genügende elektrische Leitfähigkeit besitzen.

„Unter dieser Voraussetzung würde beim Fall fester Niederschläge die Feldverstärkung im allgemeinen leichter erfolgen; man kann in diesem Zusammenhang die alte Frage¹⁾ wieder aufwerfen, ob nicht der eigentliche Sitz der Elektrizitätsentwicklung im Gewitter diejenigen Wolkenpartien sind, in denen die Niederschläge in fester, und zwar körniger Form vorhanden sind“, mit anderen Worten also in den Gebieten über der 0°-Isotherme. Wenn auch die Sohnkesche Gewittertheorie²⁾, die den maßgeblichen elektrisierenden Vorgang in der Reibung zwischen Wasser- und Eisteilchen sieht, nicht haltbar ist und deshalb nur mehr historisches Interesse besitzt, so ist der Gedanke, daß der Wasser-Eisgrenze eine besondere Bedeutung im Gewittergeschehen zukommt, bei den neuesten Untersuchungen von G. C. Simpson und F. J. Scrase wieder stark in den Vordergrund gerückt.

Als weiterer im Elster-Geitel-Vorgang evtl. mit beteiligter Effekt kommt hinzu, das „Zerblasen“ größerer Tropfen im aufsteigenden Luftstrom. J. Elster und H. Geitel faßten diese Möglichkeit schon im Zusammenhang mit ihrer ersten Gewittertheorie ins Auge³⁾, ließen sie aber später fallen, da nach P. Lenards Untersuchungen das bloße Zerfallen (Zerblasenwerden) von Tropfen von keiner merklichen Ionisation begleitet ist (genauer s. u. Abschn. III). Findet dieser wasserfall-elektrisch unwirksame Vorgang nun aber in einem starken elektrischen Felde statt, so kann er infolge der Influenzwirkung durchaus zu merklicher Ladungstrennung führen — allerdings wohl mit feldschwächender Richtung. Ebenso kann man daran denken, daß auch der wasserfall-elektrisch wirksame Lenard-Effekt durch Influenzwirkung bei positivem Feld in seiner Elektrizitätserzeugenden Wirkung verstärkt werden kann.

Diese kurzen Hinweise genügen, um die vielseitigen Möglichkeiten von Influenzeffekten in regnenden Wolken und damit die Fruchtbarkeit der Elster-Geitelschen Vorstellung für die Elektrisierung von Niederschlägen allgemein und von Gewitterwolken anzudeuten.

Ein Kriterium für die Richtigkeit der Elster-Geitelschen Influenztheorie kann folgende Überlegung geben:

Ist das ursprünglich vorhandene, d. h. das „erregende“ Feld, das normale der Erde, d. h. ist das Potentialgefälle positiv nach oben, so werden nach der entwickelten Vorstellung durch die großen Tropfen negative Ladungen zur Erde geführt, während positive in der Luft verbleiben und das Feld verstärken; ist das „erregende“ Feld umgekehrt, so führen die fallenden Tropfen positive Ladungen nach unten. Das am Erdboden bestehende Potentialgefälle muß also, wenn man von Phasenverschiebungen absieht, die durch die Falldauer der Tropfen bedingt werden, den entgegengesetzten Gang nach Größe und Vorzeichen haben, wie die von den Niederschlägen zur Erde gebrachten Elektrizitätsmengen. Dieser spiegelbildliche Verlauf

¹⁾ L. Sohncke: Met. Zeitschr. 5, 413—425, 1888.

²⁾ Ders. a. a. O.

³⁾ J. Elster und H. Geitel: Wien. Ber. (IIa) 99, 445—450, 1890.

der Vorzeichen des Potentialgefälles und der Niederschlagsladung ist in der Tat von verschiedenen Beobachtern in einer Reihe gleichzeitig aufgenommener Kurven gefunden worden¹⁾.

In Strenge trifft die Antiparallele zwischen Feldrichtung und Vorzeichen der Niederschlagsladung nicht zu, was schließlich auch nicht überraschen kann. Denn abgesehen von den verschiedenartigsten Varianten der wirksam elektrisierenden Vorgänge in den Wolken bezüglich Aggregatzustand der Wolkenelemente, Temperatureinfluß, Konvektionsbewegungen u. a. m. ist die Feldrichtung am Boden kein sicherer Beweis für die Feldrichtung in der „aktivierenden“ Wolkenzone, können durch Blitzentladungen Ladungsverlagerungen stattfinden und neue Ionisierungsquellen geschaffen werden usw. — alles Einflüsse, die in der Niederschlagsladung und ihrem Vorzeichen in Erscheinung treten müssen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß die erste Elster-Geitelsche Theorie (vgl. Abb. 1 links), nach der also die kleinen nach oben geführten Tröpfchen negative Ladung annehmen sollen, während die fallenden großen Tropfen positiv aufgeladen werden, in neuerer Zeit eine gewisse Neubelebung erfahren hat durch die Untersuchungen von T. E. W. Schumann²⁾. Nach diesen kann, wenn ein schneller fallender größerer Tropfen einen kleineren einholt und mit ihm zusammenstößt, zweierlei eintreten: Ist der eingeholte Tropfen kleiner als 0,5 mm im Durchmesser, dann fließt er mit dem größeren Tropfen zusammen, ohne daß etwas weiteres geschieht. Ist er dagegen größer, dann lösen sich bei dem heftigen Stoß von der Oberseite des größeren Tropfens eine große Zahl kleiner Tröpfchen ab und nehmen die an seiner Oberseite sitzende Influenzladung mit. Bei positivem Potentialgefälle wird somit der Rest des großen Tropfens positiv, bei negativem Gefälle negativ geladen zurückbleiben.

Ein solches Zerspritzen von Tropfen beim Zusammenstoß wurde von H. Mache³⁾ bei Landregen direkt beobachtet und von T. E. W. Schumann (a. a. O.) photographisch festgehalten. Überschlagsrechnungen zeigen, daß dies Zerspritzen der Tropfen zur Erklärung der Ladung von Landregen hinreicht. Ob und wie weit er auch bei der Gewitterbildung mit beteiligt ist, ist schwer abzusehen.

Abschließend ist zu sagen, daß die von J. Elster und H. Geitel entwickelten Influenzvorstellungen beim Fall von Niederschlägen und ihre hierauf aufgebaute Gewittertheorie, die deshalb besonders bestechend ist, weil sie für die Elektrizitätsbildung im Gewitter und im nicht gewittrigen Niederschlagsgeschehen die gleichen Ursachen zugrunde legt, bis heute ernstlich zur Diskussion steht und in ihrer durch C. T. R. Wilson modernisierten und erweiterten Gestalt den wahren Verhältnissen besser gerecht zu werden scheint, als die auf dem Lenard-Effekt allein aufbauende Gewittertheorie von G. C. Simpson.

2. Die Gewittertheorie von C. T. R. Wilson.

C. T. R. Wilson⁴⁾ geht bei seiner Diskussion des Gewittermechanismus von ähnlichen Vorstellungen aus, wie J. Elster und H. Geitel, folgert jedoch, daß das Influenzgeschehen allein den Ladungsbedarf eines Gewitters nicht zu decken vermag, und diskutiert das Auftreten neuer in den hohen Gewitterfeldern selbst erst möglich werdender Ionisationsquellen. Das Neuartige an seinen Überlegungen ist einmal diese Postulierung neuer gewittereigener Ionisation (Spitzenentladung an deformierten Wassertropfen und Bildung einer β -Strahlung in Gestalt der nach ihm benannten „Wilson-Elektronen“) und zum anderen die Auffassung des Gewitters als atmosphärischer Dynamomaschine mit dem Enderfolg der Aufrechterhaltung der negativen Erdladung.

a) Prinzip der Ladungsentstehung. Der Elementarvorgang der Ladungsentstehung ist nach Wilsons Auffassung folgender: Im elektrischen Feld der Atmosphäre ist ein dauernder Ionenstrom positiver und negativer Ionen in entgegengesetzter Richtung vorhanden: bei normalem nach oben positivem Feld

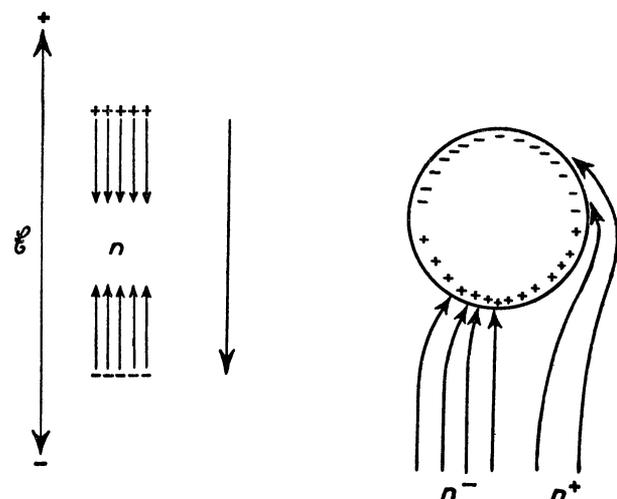


Abb. 2. Tropfenladung durch Ionenfang nach C. T. R. Wilson.

¹⁾ J. Elster und H. Geitel: Terr. Magn. 4, 15—29, 1899; E. Weiß: Wien. Ber. (IIa) 115, 1285—1320, 1906; H. Bendorff: Sitz.-Ber. Kgl. Bayer. Akad. 1912, S. 426.

²⁾ T. E. W. Schumann: Phys. Rev. (2) 26, 105, 1926.

³⁾ H. Mache: Met. Zeitschr. 36, 350, 1919.

⁴⁾ C. T. R. Wilson: Journ. Frankl. Inst. 208, 1—12, 1929.

wandern die positiven Ionen mit einer der Feldstärke und ihrer Beweglichkeit entsprechenden Geschwindigkeit nach unten, die negativen mit einer nur wenig verschiedenen Geschwindigkeit nach oben (in der Abb. 2 links durch Pfeilbündel angedeutet). Fällt nun in einem solchen Medium ein Wassertropfen nach unten, so findet in ihm zunächst durch Influenz Ladungstrennung statt; seine Oberseite zeigt negative, seine Unterseite positive Oberflächenladung. Sein Verhalten gegenüber den Luftionen hängt davon ab, ob er sich schneller oder langsamer bewegt als die in gleicher Richtung wandernden positiven Ionen. Im ersten Fall, der in der Abb. 2 rechts skizziert ist, wird seine positiv influenzierte Unterseite die ihm entgegenkommenden negativen Ionen aufnehmen, die von ihm überholten positiven Ionen dagegen abstoßen; diese wandern gemäß den Stromlinien der ausweichenden Luft an ihm vorbei und können höchstens von rückwärts (oben) die negativ influenzierte Oberfläche erreichen; von oben her können positive Ionen wegen ihrer kleineren Geschwindigkeit überhaupt nicht auf den Tropfen gelangen. Die Folge ist die, daß der Tropfen wahre negative Ladung annimmt. Fällt der Tropfen langsamer als sich die Ionen bewegen, so gilt das Umgekehrte: er lädt sich positiv auf.

Beginnt jetzt also in einer ursprünglich elektrisch neutralen Wolke durch Tropfenbildung unter dem Einfluß der Schwere eine räumliche Trennung der verschiedenen großen Wolken- bzw. Niederschlags-elemente, so entsteht in den unteren (oberen) Wolkenpartien eine an größere (kleinere) Tröpfchen gebundene negative (positive) Ladungsanhäufung — es bildet sich eine bipolare Wolke aus, die man gemäß der in ihr herrschenden Feldrichtung als „positiv-polar“ zu bezeichnen pflegt.

Daß dieser Vorgang der Ladungsbildung auf fallenden Tropfen in der Tat in dieser Weise abläuft, ist in einer späteren Laboratoriumsuntersuchung eines Schülers von C. T. R. Wilson experimentell bewiesen worden: I. P. Gott¹⁾ läßt Tropfen durch einen in einem Kondensator mit hohem Feld strömenden künstlichem Nebel gleicher Anzahl positiver und negativer Tröpfchen in Feldrichtung hindurchfallen und bestimmt elektrometrisch die von ihnen aufgenommene Ladung. Die Fallgeschwindigkeit der Tropfen ist wesentlich größer gehalten als die Wanderungsgeschwindigkeit der geladenen Nebelteilchen. Ist das Feld nach oben positiv (negativ), so kommen die fallenden Tropfen in der Tat wie zu erwarten negativ (positiv) geladen im Sammelgefäß an und geben damit eine experimentelle Bestätigung für die Richtigkeit der Grundvorstellung. (Ob die Aufladung durch Ionen oder geladene Nebeltröpfchen zustande kommt, bleibt sich im Enderfolg natürlich gleich²⁾.)

Der geschilderte Vorgang wirkt — ebenso wie der Grundprozeß der zweiten Elster-Geitelschen Theorie — feldverstärkend. Das bedeutet aber, daß auch die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen zunimmt und daß der auf dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen Tropfen und Ionen beruhende Aufladungsprozeß an Wirksamkeit verliert; ebenso wirkt die Feldverstärkung bremsend auf den Fall der negativ geladenen großen und auf die Aufwärtsbewegung der positiv geladenen kleinen Tropfen ein. Der ganze Vorgang strebt mit anderen Worten asymptotisch einem Gleichgewicht zu. Je nach den meteorologischen Zusatzbedingungen kann dieses vor Erreichung der zur Blitzentladung notwendigen Feldstärke der Fall sein — dann bleibt der Cumulo-Nimbus im Vorgewitterstadium stehen — oder der Gleichgewichtszustand liegt erst bei höherer als blitzauslösender Feldstärke — dann wird sein Erreichen durch eine Entladung unterbrochen, das aufgebaute Feld weitgehend zerstört und der Ladungsmechanismus erneut eingeleitet.

b) Rechnerische Abschätzungen. Um zu einer Abschätzung des Ionenbedarfes und des gesamten elektrisch-energetischen Geschehens im Gewitter zu gelangen, knüpft C. T. R. Wilson an folgende Erfahrungstatsachen an:

Aus den durch Blitze am Boden hervorgerufenen Feldänderungen kann man, wie unten näher ausgeführt wird, bei genügender Entfernung vom Blitzherd und gleichzeitiger Bestimmung von Blitzentfernung und -art (Wolkenblitz oder Erdblitz) Rückschlüsse auf die Stromrichtung und den Ladungstransport ziehen. Gleichzeitig gibt der weitere Verlauf der Feldänderung ein Bild vom Neuaufbau des Feldes in der Wolke nach dem Blitz. Nach eigenen³⁾ und anderen⁴⁾ Untersuchungen dieser Art wird durch einen Blitz ein elek-

¹⁾ I. P. Gott: Proc. Royal. Soc. **151**, 665—684, 1935.

²⁾ Die genannten Versuche sind noch in anderer Richtung von Interesse: Man sollte an und für sich erwarten, daß bei diesem Vorgang eine einfache Beziehung zwischen der aufgenommenen Ladungsmenge eines Tropfens und der Leitfähigkeit (Ladungszahl) des durchfallenen Nebels besteht; indes ist dies anscheinend nicht der Fall, vielmehr nimmt die Aufladung mit zunehmender Leitfähigkeit des Nebels beschleunigt zu — eine vorerst schwer deutbare Tatsache. Es sei hier nur darauf hingewiesen, daß diese Erscheinungen möglicherweise bei genauerer Untersuchung eine Entscheidung darüber erlauben kann, ob bei einer solchen Anordnung auch der Elster-Geitelsche Grundprozeß erster oder zweiter Art mitwirkend beteiligt ist. Gott selbst deutet die genannten Abweichungen vom erwarteten Verlauf durch Fehlereffekte im Meßgang und hält die Mitwirkung des Elster-Geitel-Effektes für nicht wahrscheinlich, muß aber die endgültige Entscheidung darüber offenlassen.

³⁾ C. T. R. Wilson: Proc. Roy. Soc. **92**, 555—574, 1916; Phil. Trans. Roy. Soc. **221**, 73—115, 1921.

⁴⁾ E. V. Appleton, R. A. Watson Watt and J. F. Herd: Proc. Roy. Soc. **111**, 654—677, 1926; B. F. J. Schonland: Proc. Roy. Soc. **114**, 229—243, 1927 u. a.

trisches Moment der Größenordnung 10^{16} Ces · cm (etwa 30 Coulomb · km) zerstört. Die „Erholung“ verläuft so, daß in den meisten Fällen 10% des zerstörten Momentes während der ersten Sekunde nach der Entladung wieder aufgebaut werden. Als weitere Grundlage wird die zur Auslösung eines Blitzes nötige Feldstärke zu 10000 V/cm (33 Ves/cm) angenommen.

Legt man diese Werte zugrunde, so kommt man zunächst in einfacher Weise zu einer Abschätzung der Mindestausdehnung eines Gewitterzentrums: Sieht man in Annäherung die Begrenzungen des oberen und unteren Ladungszentrums der Gewitterwolke als eben an, so ist ihr elektrisches Moment gegeben durch

$$M = \sigma \cdot O \cdot h$$

wo σ die Oberflächendichte der (flächenhaft gedachten) Ladung an der oberen bzw. unteren Wolkengrenze, O die Oberfläche der betreffenden Partien und h ihren vertikalen Abstand bedeuten. Setzt man für σ den Ausdruck $F/4\pi$ und für die Feldstärke F den oben angenommenen Wert von 10000 V/cm (33 Ves/cm) ein, so folgt mit $M = 10^{16}$ Ces · cm für $O \cdot h$, d. h. für das Volumen ein Wert von rund 4 km^3 .

Da weiter die Energie eines elektrischen Feldes gleich dem halben Produkt aus Potentialdifferenz und Ladung ist, so folgt für den Energieinhalt E eines Blitzes

$$E = \frac{1}{2} \cdot q \cdot V = \frac{1}{2} \cdot q \cdot F \cdot h = \frac{1}{2} \cdot M \cdot F$$

ein Betrag von $1,6 \cdot 10^{17}$ erg oder $1,6 \cdot 10^{10}$ joul.

Eine Abschätzung des beim Regenerationsvorgang in der Wolken fließenden Vertikalstromes macht noch eine Zusatzannahme über die vertikale Erstreckung des hohen Feldes von 10000 V/cm notwendig. Hierfür nimmt Wilson den — sicherlich zu hoch gegriffenen — Wert von 1 km an, so daß also die gesamte Spannungsdifferenz beim Auslösen einer Blitzentladung 10^9 Volt beträgt. Danach muß der horizontale Wolkenquerschnitt etwa 4 km^2 betragen. Da weiter die „Erholung“ des Feldes unmittelbar nach einem Blitz in der ersten Sekunde meist schon 10% beträgt, so muß in dieser Zeit ein Moment von etwa 10^{15} Ces · cm wieder aufgebaut werden. Verteilt auf die Fläche von 4 km^2 und die vertikale Mächtigkeit von 1 km erfordert dies einen Elektrizitätsfluß von rund $\frac{1}{4}$ Aes/cm² oder 1 Amp/km². Dies ist die „Ausbeute“, die der „Gewitterdynamo“ liefern muß.

Die Wirkung der Gewittermaschine beruht auf der Relativbewegung der fallenden negativen Tropfen gegenüber den positiven Trägern. Nimmt man an, daß diese Relativbewegungen im wesentlichen durch die Fallgeschwindigkeit der Tropfen gegeben ist und 600 cm/sec beträgt — was nach P. Lenard¹⁾ etwa für Tropfen von 1 mm Radius zutrifft — so muß nach dem obigen in einem Wolkenstück von 4 km^2 Querschnitt und 6 m Vertikalerstreckung eine Elektrizitätsmenge von 10^{10} Ces, im ganzen Gewitterzentrum also eine solche von rd. $1,6 / 10^{12}$ Ces freigemacht werden können; das sind aber 500 Coul, mit anderen Worten eine für 5—10 Blitze ausreichende Ladungsmenge²⁾.

Diese letzte Zahl gestattet nun auch, den Wasserumsatz der „Gewittermaschine“ abzuschätzen: Ist eine solche Elektrizitätsmenge als Summe der negativ geladenen Tropfen vorhanden und ein Feld von 10000 V/cm (33 Ves/cm) aufgebaut, so beträgt die Kraft, die zum Tragen der geladenen Wassermenge zur Verfügung steht, $33 \cdot 1,6 \cdot 10^{12} = 5 \cdot 10^{13}$ dyn; diese Kraft ist in der Lage, $5 \cdot 10^{10}$ g Wasser gegen die Schwerkraft in der Schwebe zu halten. Auf 4 km^3 verteilt würde das 12 g/m^3 ergeben bei einer Ladung von 30 Ces/cm^3 Wasser — oder von 0,125 Ces/Tropfen bei 1 mm Tropfenradius.

Entscheidend ist nun die Frage, ob der geschilderte Grundprozeß einen solchen Ladungsbedarf und derart hohe Aufladungen von Einzeltropfen zu liefern vermag. Rechnet man mit der oben genannten Zahl von $1,6 \cdot 10^{12}$ Ces/ 4 km^3 Wolke und bestimmt daraus die Ionenzahl, die für eine solche Ladungsanhäufung aus jedem cm³ entnommen werden muß, so erhält man den außerordentlich hohen Wert von rd. $8 \cdot 10^5$ Ionen (Elementarladung = $4,8 \cdot 10^{-10}$ Ces), d. h. eine Zahl, die durch die natürlichen Ionisatoren der Atmosphäre auch nicht im entferntesten gedeckt werden kann und zur Annahme neuer gewitterfeldgebundener Ionisationsquellen zwingt.

Bevor wir auf diese prinzipiell neuen von C. T. R. Wilson postulierten Zusatzionisatoren eingehen, zunächst noch eine Abschätzung der beim geschilderten Grundprozeß möglichen Tropfenauf Ladungen.

¹⁾ P. Lenard: Met. Zeitschr. **21**, 249—262, 1904.

²⁾ Es ist auf den ersten Blick überraschend, daß nach den obigen Annahmen eines Momentes von 30 Coul · km, das den Überschlagsrechnungen zugrundegelegt wurde, hier eine zum Aufbau eines zehnmal so großen Momentes ausreichende Ladungsmenge errechnet wird. Der Grund liegt in der Voraussetzung einer in der ersten Sekunde nach dem Blitz 10proz. „Erholung“ des abgebauten Feldes, wie sie Wilson aus seinen Feldänderungsmessungen ableitet. Über die Deutung solcher Registrierungen sind nun kürzlich neue Gesichtspunkte erörtert worden, die die Wilsonsche Deutung als nicht unbedingt gesichert erkennen lassen.

Die unipolare Ionenabsorption eines fallenden Tropfens schreitet solange fort, bis dessen Influenzladungsbild durch die aufgenommenen Ladungen merklich modifiziert wird — anders gesagt, bis er in seiner Umgebung ein wirksames Gegenfeld erzeugt, daß die Ionenzuwanderung von unten verlangsamt und von oben beschleunigt. Die Oberflächendichte σ der Influenzladung einer ungeladenen Kugel in einem homogenen Feld \mathcal{E} hat den Wert

$$\sigma = \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \mathcal{E} \cdot \cos \vartheta$$

wo ϑ der Winkel zwischen Feldrichtung und Radiusvektor ist. Für einen Tropfen von 1 mm Radius in einem Feld von 33 Ves/cm liefert die Integration für die Ladungssumme jeder Halbkugelbelegung ungefähr $\frac{1}{4}$ Ces. Nimmt man nun an, daß durch den negativen Ionenfall der 10. Teil dieses Wertes als wahre Ladung aufgenommen wird, so beeinflußt die dadurch bedingte Felddeformation den Prozeß als solchen noch nicht wesentlich; die Ladungsaufnahme erreicht aber trotzdem schon den recht beachtlichen Wert von $\frac{1}{40}$ Ces pro Tropfen oder 6 Ces/cm³ Wasser.

Die Grenze der Tropfengröße, unterhalb deren sich der Ladungsvorgang zu positiver Aufladung wandelt, hängt im wesentlichen von der Ionenbewegung ab. Hat diese den für Großionen bekannten Wert, so liegt die Grenze bei etwa 0,005 cm Radius.

c) Die gewittereigenen Ionisationsquellen. Die rechnerischen Abschätzungen des vorigen Kapitels setzen sämtlich die Existenz eines sehr hohen elektrischen Feldes in der Wolke schon voraus. Wie sich dessen Aufbau primär im einzelnen gestaltet, darüber läßt sich nicht viel sagen. Wilson deutet nur an, daß hierfür vermutlich das ursprünglich vorhandene Feld und die durch die bekannten atmosphärischen Ionisatoren gebildeten Ionen verantwortlich sind und daß nach Einleitung des Regenstadiums innerhalb der Wolke „the original building up of the field of the cloud may be much more gradual“. Dem „atmosphärischen Dynamo“ wird also in diesem „Anlaufstadium“ durch das ursprüngliche Feld vor allem seine „Stromrichtung“ aufgeprägt werden, die zur Ausbildung der positiv-polaren Wolke führt.

Ist auf diesem — oder anderem vorläufig noch unbekanntem — Wege eine genügend hohe Feldstärke zwischen den Ladungsgebieten im oberen und unteren Teil der Wolke erreicht, so kommt als ionenerzeugender Vorgang Spitzenladung an deformierten Wassertropfen in Betracht.

Die Deformation von Wassertropfen in starken elektrischen Feldern ist verschiedentlich untersucht worden¹⁾. Danach nehmen mit zunehmender Feldstärke die Tropfen in immer stärkerem Maße eine in Feldrichtung gestreckte Form an, bis die elektrostatischen Anziehungskräfte die Oberflächenspannung überwinden und feine Wasserfäden aus den Tropfenenden herausziehen. Nach W. A. Macky (J. J. Nolan) ist dieser Zustand erreicht, wenn

$$F \sqrt{r} = 3875 \text{ (3880)}$$

wird (F = Feldstärke in V/cm; r = Tropfenradius). Abb. 3 zeigt die einzelnen Stadien eines Tropfens von 0,25 cm Radius beim Fall durch ein vertikales Feld von 8250 V/cm ($F \sqrt{r} = 4125$). Auf den rechten Teilbildern der Abb. 3 (Tafel 1) erkennt man deutlich die Ausbildung eines Wasserfadens. Noch klarer zeigt das die Abb. 4 (Tafel 1); aus einem Tropfen gleicher Größe wie im vorigen Bild wird durch ein etwas stärkeres Feld (8300 V/cm) ein langer Wasserfaden herausgezogen, der dann in feine Tropfen zu zerfallen beginnt.

Die Tropfen, die derart verformt und zu Spitzen ausgezogen werden, zeigen an diesen je nach dem Pol eine typische positive und negative Büschel- (Spitzen-)entladung. Bei nur geringem Überschreiten der kritischen Feldstärke fand W. A. Macky Entladungsströme von 20 Mikro-Amp. durch solche zugespitzte Tropfen. Ohne Frage ist mit diesem Vorgang also eine außerordentliche Ionisationsvermehrung im Feldraum verbunden, die von Wilson postulierte zusätzliche gewitterfeldeigene Ionisationsvervielfachung also experimentell bewiesen.

Eine weitere Folgeerscheinung der hohen Feldstärken ist die folgende: Die Ionisation der Luftmoleküle kommt so zustande, daß durch irgend einen genügend energiereichen Vorgang ein Elektron aus deren Molekülverband herausgeschlagen wird; das Molekül bleibt — mit einer positiven Elementarladung versehen — geladen zurück. Das Elektron ist in Luft nicht frei beständig und rekombiniert mit einem positiv geladenen Molekül oder wird von einem neutralen aufgenommen und verleiht diesem die Ladung $-4,80 \cdot 10^{-10}$ Ces. Ist jetzt aber die Feldstärke zu hoch, daß ein solches Elektron in der kurzen Zeit zwischen seiner Freisetzung und dem ersten Zusammenstoß mit einem Molekül bereits eine so hohe

¹⁾ J. Zeleny: Phys. Rev. **16**, 102, 1920 (Wassertropfen an Ausflußkapillaren). C. T. R. Wilson and G. J. Taylor: Proc. Cambr. Phil. Soc. **22**, 728, 1925 (Seifenblasen in elektrischen Feldern). W. A. Macky: Proc. Cambr. Phil. Soc. **26**, 421, 1930 (Seifenblasen in elektrischen Feldern). J. J. Nolan: Proc. Roy. Irish Acad. (A) **37**, 28—39, 1926 (Freifallende Tropfen). W. A. Macky: Proc. Roy. Soc. **153**, 565—587, 1931 (Freifallende Tropfen).

Geschwindigkeit einnimmt, daß es von diesem nicht mehr eingefangen werden kann, so verliert es beim Zusammenstoß mit diesem nur einen Teil seiner kinetischen Energie — die zur Auslösung eines weiteren Elektrons, d. h. also erneuter Ionisation führen kann — bleibt aber frei beständig und erfährt bis zu seinem nächsten Zusammenstoß erneuten Energiezuwachs usw. Mit anderen Worten nehmen die Elektronen in genügend hohen Feldern wie sie in Gewittern wahrscheinlich sind, die Eigenschaften freier, sehr rasch bewegter und zur Ionisation befähigter Elementarteilchen an — sie werden zu β -Strahlen. Durchlaufen sie das oben zu insgesamt 10^9 Volt geschätzte Gewitterfeld, so können sie unter Umständen durch allmählichen Energiegewinn zu Geschwindigkeiten entsprechend der Gesamtfeldstärke anwachsen, d. h. zu Ultra- β -Teilchen werden, deren Reichweite in der Größenordnung der gesamten Atmosphärenhöhe liegt.

Wenn auch für die Existenz solcher gewitterbedingten Ultra- β -Teilchen ein direkter experimenteller Beweis schwer erbracht werden kann, so ist die Möglichkeit ihrer Entstehung fraglos gegeben. Wilson selbst diskutiert den Gedanken, daß diese ungeheuer energiereichen Teilchen die Atmosphäre nach oben durchstoßen können und entsprechend ihrer Ablenkung durch das Magnetfeld der Erde auf Spiralbahnen wieder auf deren Oberfläche zurückkehren — was für die bezüglich ihres Ursprungs noch nicht endgültig geklärte Ultrastrahlung (oder doch für einen Teil derselben) eine terrestrische Ursache, eben das Gewittergeschehen, bedeuten könnte.

d) Das Gewitter und seine Begleiterscheinungen. Das Gewitter ist nach der oben entwickelten Wilsonschen Anschauung eine Art atmosphärische Großdynamomaschine, die den Zustrom positiver Elektrizität im normalen luftelektrischen Vertikalstrom kompensiert und somit für die Aufrechterhaltung der negativen Erdladung und die Existenz eines elektrischen Feldes in der Atmosphäre überhaupt entscheidend verantwortlich ist.

Zum besseren Verständnis dessen betrachten wir die Vorgänge inner- und außerhalb der Wolke nochmal kurz im einzelnen.

Energetisch getragen wird der ganze Vorgang der räumlichen Ladungstrennung durch die kinetische Energie der fallenden Regentropfen. Wie es zum Regenbeginn kommt, mit anderen Worten welche energetischen Vorgänge zwischen die letzten Endes verantwortliche von der Sonne zugestrahlte Wärmeenergie und den Energievorrat der fallenden Regentropfen zwischengeschaltet sind und wie sie im einzelnen aussehen, bleibt unbeantwortet. Ist der Vorgang eingeleitet, so läuft er in der geschilderten Weise ab. Die Begleiterscheinungen, wie die Fallbremsung der sich aufladenden Tropfen bis zum Schwebenbleiben, wie die Deformation der Tropfen bis zur Spitzenausbildung und die entstehende Spitzentladung u. a. sind gemäß dem „Prinzip des kleinsten Zwanges“ (Le Chatelier-Prinzip) automatische Gegenreaktionen, die den Vorgang abzuschwächen bestrebt sind, die aber infolge der dauernden weiteren Energiezufuhr seitens der fallenden Tropfen zu seiner sich selbst steigernden Verstärkung führen.

Eine Blitzenentladung innerhalb der Wolke bremst den Ladungsprozeß ab, unterbricht gewissermaßen als Kurzschluß für einen Augenblick die Influenzmaschine, um sie hinterher erneut einsetzen zu lassen; bezüglich der Dynamowirkung des Gewitters — die man als Abfluß positiver Ladung von, oder was auf dasselbe hinauskommt, als Zufluß negativer Ladung zur Erde aufzufassen hat — bedeutet eine solche Entladung also keine prinzipielle Änderung. Anders die Blitze zwischen Wolke und Erde.

Betrachten wir hierzu zunächst, wie das elektrische Feld in Bodennähe auf ein vorbeiziehendes Gewitter reagiert. Das elektrische Feld einer bipolaren Wolke am Boden berechnet sich bekanntlich folgendermaßen: Ist über einer leitenden Ebene — Erdoberfläche — in der Höhe z eine punktförmige Ladung $+Q$ — bzw. ein in erster Näherung als Punktladung aufzufassendes Raumladungsgebiet (Wolke) — vorhanden, so kann man das elektrische Feld oberhalb der Ebene am einfachsten bestimmen, wenn man die auf der Ebene verteilte Influenzladung ersetzt denkt durch das elektrische Bild $-Q$ im Abstand $-z$ (vgl. Abb. 5). Das elektrische Feld eines solchen Dipols hat dann im Abstand x vom Fußpunkt der Dipolachse an der Oberfläche der Ebene den Wert

$$\mathcal{E}(x) = \frac{2Qz}{r^3} = \frac{2Qz}{(z^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{2Q}{z^2} \cdot \left(1 + \frac{x^2}{z^2}\right)^{-3/2}.$$

Für $x=0$ wird $\mathcal{E} = \frac{2Q}{z^2}$. Setzt man dies $= \mathcal{E}_0$ und wählt z als willkürliche Längeneinheit, so wird, wenn noch $x/z = \xi$ gesetzt wird,

$$\mathcal{E}(\xi) = \mathcal{E}_0 f(\xi) \quad \text{ist.}$$

$$f(\xi) = (1 + \xi^2)^{-3/2}$$

wo

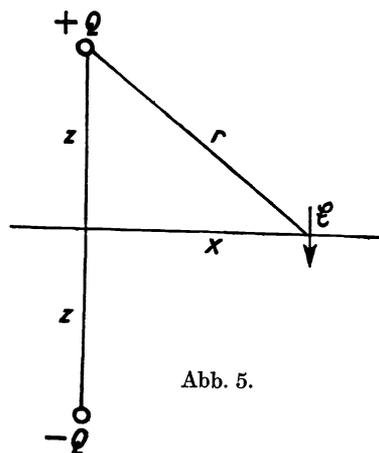


Abb. 5.

Ist nun über der Ladung $+Q$ in der Höhe z noch eine gleichgroße negative Ladung $-Q$ in der Höhe $z' = kz$ ($k > 1$) vorhanden, so berechnet sich das Feld $\mathfrak{F}(\xi)$ am Boden als Superposition zweier ineinandergreifender Dipole in einfacher Weise zu

$$\mathfrak{F}(\xi) = \mathfrak{E}(\xi) + \mathfrak{E}'(\xi) = \frac{2Q}{z^2} \cdot \left[f(\xi) - \frac{1}{k^2} \cdot f\left(\frac{\xi}{k}\right) \right] = \frac{2 \cdot Q}{z^2} = \Phi_k(\xi).$$

Die Diskussion der Funktion $\Phi(\xi)$ ergibt, daß sie von einem Maximalwert $\xi = 0$ abnimmt, für ein bestimmtes ξ_0 das Vorzeichen wechselt und nach Durchlaufen eines Maximalwertes nach dieser Richtung asymptotisch zu 0 abnimmt. In Abb. 6 ist dieser Verlauf für 3 Werte von k graphisch dargestellt.

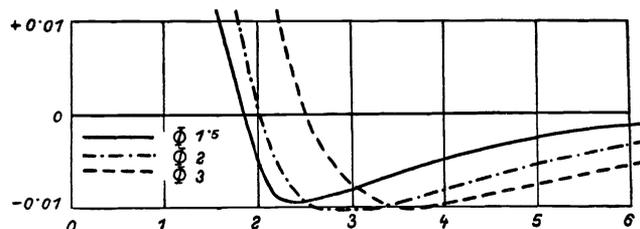


Abb. 6. Verlauf der Funktion (nach E. Schweidler¹⁾). Für $k = 1,5, 2$ und 3 .

Ins Anschauliche übersetzt heißt das also, wenn wir jetzt einen Raumladungs- (Wolken-) Dipol umgekehrter Polarität wie oben — mit anderen Worten ein Wilsonsches Gewittermodell — betrachten und sein elektrisches Feld am Boden untersuchen, so überlagert sich dem ursprünglich positiven Schönwetterfeld bei seiner Annäherung zunächst ein gleichgerichtetes langsam anwachsendes Feld. Hat die Gewitterwolke eine gewisse Nähe erreicht, so kehrt das Feld seine Vorzeichen um und wächst zu hohen negativen Beträgen an, da jetzt der stark negativ

geladene untere Wolkenteil die Feldrichtung bestimmt; nach Vorbeizug des Gewitters kehrt das Feld in umgekehrter zeitlicher Richtung wieder zur alten Richtung zurück. Vorzeichenbestimmungen des Feldes bei vorüberziehendem Gewitter können hiernach also ein gewisses Kriterium für die Richtigkeit der angenommenen Wolkenpolarität liefern. Näheres hierüber in Kap. IV.

Eine Entladung innerhalb der Wolke hat nun ebenso wie eine solche von der Wolke zur Erde einen Feldsprung am Boden zur Folge, aus dem man, wie schon oben gesagt, zum mindesten in Annäherung auf Größe und Richtung des Ladungsumsatzes schließen kann.

Trifft die Wilsonsche Gewitteranschauung zu, so ist also zu erwarten, daß sowohl die Ladungszufuhr zur Erde durch Blitze wie auch der Ladungsverlust durch Spitzenentladung an Bäumen und anderen exponierten Stellen bei dem starken negativen Potentialgradienten unter der Gewitterwolke beide in der gleichen Richtung wirken, nämlich die negative Ladung der Erde vermehren, d. h. die Blitze müßten überwiegend sog. negative Blitze sein, der Vertikalstrom überwiegend umgekehrtes Vorzeichen haben als normal.

Die elektrische Ladung der Niederschläge, die, wie sich im nächsten Kapitel zeigen wird, für G. C. Simpson ausschlaggebender Ausgangspunkt für den Aufbau eines Gewittermodelles war, ist für die Polarität der Wolke kein sicheres Kriterium, da der Regen auf seinem Wege von der Wolke zur Erde sehr wohl der Feld- und damit der Bewegungsrichtung der Ionen entsprechend eben nach der Wilsonschen Vorstellung sein Vorzeichen umkehren kann.

Betrachten wir nun die Vorgänge über der Wolke. Durch die postulierten negativen Blitze und den umgekehrten Vertikalstrom fließt der Gewitterwolke positive Ladung zu, die nun, um die Dynamowirkung zu vervollständigen, nach oben weggeschafft werden muß. Dies geschieht nach Wilson auf folgende Weise: Die normale Leitfähigkeit zwischen dem oberen Wolkenrand in mehreren Kilometer Höhe und der Ionosphäre ist zwar schon erheblich größer als die in den unteren Atmosphärenschichten, könnte aber nicht ausreichen, um den von der Erde zur Wolke gehenden Vertikalstrom aufzunehmen, wenn nicht hier ebenfalls eine durch das Gewitterfeld selbst hervorgerufene Ionisationsvermehrung wahrscheinlich wäre. Wilson sieht für eine solche folgende Möglichkeiten:

Die normale Potentialdifferenz zwischen der negativen Erdoberfläche und der positiven Gegenbelegung in der Ionosphäre beträgt größenordnungsmäßig 250—300 kV. Ist nun in der Atmosphäre ein Vorgang wirksam, der in sich einen Dipol von der obengenannten Größenordnung 10^6 kV positiver Polarität erzeugt, so kehrt sich nicht nur die Feldrichtung unter, sondern auch über der Wolke um. Dadurch können Elektronen, die den höheren ionisierten Schichten entstammen, nach unten zur Wolke hin angezogen und dabei so beschleunigt werden, daß sie als Wilsonsche β -Strahlung an der Ionisation teilnehmen; ferner wird ein Teil der im Gewitterzentrum entstandenen Wilson-Elektronen das obere Ladungsgebiet durchstoßen und oberhalb desselben weiter ionisieren; endlich kann man auch annehmen, daß vom oberen Wolkenrand positiv geladene Tropfen — ebenfalls zur Spitzenform deformiert — Spitzentladung erzeugen, und schließlich,

¹⁾ E. v. Schweidler: Die Aufrechterhaltung der elektrischen Ladung der Erde, Hamburg 1932.

daß sie auch nach oben herausgetrieben werden, in der ungesättigten Luft verdampfen und so ihre Ladung in beweglicherer Form zum Elektrizitätstransport „zur Verfügung“ stellen. Wilson hält es nicht für ausgeschlossen, daß dieses Heraustreiben und allmähliche Verdampfen von Wolken- und Niederschlags-elementen in den die Gewitterwolke begleitenden „falschen Cirren“ sichtbar wird.

Alle diese an das Wilsonsche Gewittermodell geknüpften Konsequenzen hinsichtlich der Aufrechterhaltung der negativen elektrischen Ladung der Erde hätten, da keine Aussicht für eine laboratoriumsmäßige Nachprüfung der geschilderten Prozesse besteht und direkte Untersuchungen der Art in und über den Gewitterwolken bis vor wenigen Jahren ganz fehlten, nur die Bedeutung interessanter Spekulationen, wenn nicht die Messung des normalen atmosphärisch-elektrischen Feldes über den Ozeanen, wie sie die Carnegie Institution jahrelang durchgeführt hat¹⁾, einen überraschenden Hinweis in dieser Richtung dadurch geliefert hätten, daß die dabei aufgefundenen Weltzeitperiode des täglichen Gefälleganges mit dem Tagesgang der Gewitterhäufigkeit auf der Erde in engem Zusammenhang steht. Ohne auf diese Dinge hier näher einzugehen, sei nur in der folgenden Abb. 7 diese Parallele im Bild wiedergegeben. Im oberen Teil der Abbildung sind die mittleren Tageskurven des Potentialgradienten in der Arktis und auf den verschiedenen Ozeanen dargestellt; der untere Teil zeigt die Gewitterhäufigkeit über den einzelnen Kontinenten nach Weltzeit und ihre Hüllkurve nach F. J. W. Whipple und F. J. Scrase²⁾. Die weitgehende Ähnlichkeit der beiden Kurven macht ihren inneren Zusammenhang sehr wahrscheinlich.

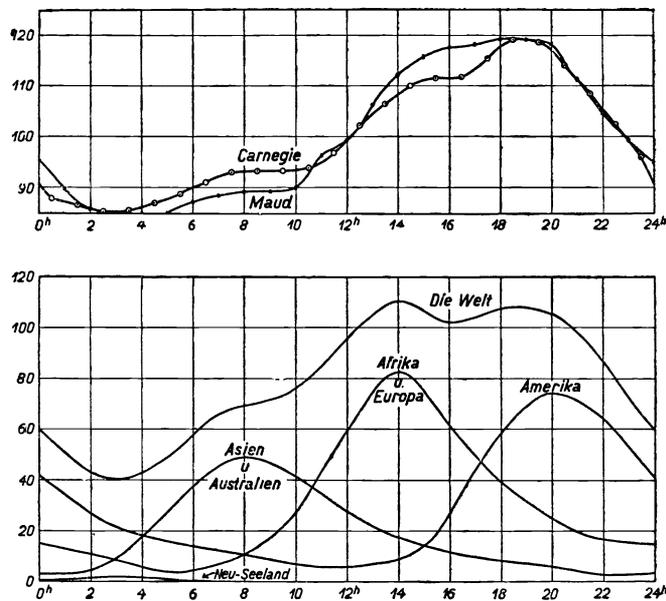


Abb. 7. Weltzeitlicher Gang des Potentialgradienten (oben) und der Gewitterhäufigkeit (unten).

III. Die „Wasserfalltheorie“ des Gewitters.

G. C. Simpson³⁾ geht bei seiner Gewittertheorie vom sog. „Lenard-Effekt“ aus und sieht den entscheidenden Faktor des elektrischen Gewittermechanismus im Zersprühen fallender Regentropfen in aufwärtsgerichteten Luftströmen und der damit verbundenen Ladungstrennung.

1. Der Lenard-Effekt. Läßt man Wassertropfen oder -strahlen auf ein Hindernis auffallen, so tritt beim Zerspritzen eine starke Elektrisierung auf; das Wasser lädt sich positiv, während die umgebende Luft negative Ladung annimmt. P. Lenard⁴⁾, der diese Erscheinung systematisch untersuchte, sah ihre Erklärung darin, daß an der Grenzfläche Wasser—Luft eine elektrische Doppelschicht existiert, die beim gewaltsamen Zerreißen zur Bildung von freier Ladung führt. Zerteilen der Wasseroberfläche allein (Auflösen eines Strahles in Tropfen u. ä.) genügte zur Ladungserzeugung nicht. Aus diesem Grunde schien zunächst die Übertragung des Effektes auf das atmosphärische Geschehen, bei dem das zum Zerspritzen führende feste Hindernis fehlt, fraglich. Das „Zerblasen“ von fallenden Tropfen in einem aufwärtsgerichteten Luftstrom blieb bezüglich der elektrischen Effekte widerspruchsvoll⁵⁾ und wurde deshalb von ihm nicht zu entfernteren Voraussagen über das Gewitter- und Niederschlagsgeschehen ausgeweitet; doch zeitigten diese Versuche in anderer Richtung ein für das weitere recht bedeutungsvolles Ergebnis:

Die Endfallgeschwindigkeit von Regentropfen nimmt mit zunehmender Größe der Tropfen nicht gemäß dem Stokesschen Fallgesetz immer mehr zu, sondern erreicht mit 8 m/sec einen Höchstwert unter gleichzeitiger Begrenzung maximaler stabiler Tropfengröße auf etwa 5 mm Durchmesser. Tropfen dieser Größenordnung werden beim Fallen bereits merklich deformiert — in Fallrichtung abgeflacht — größere nach Abflachung und hutförmiger Aufwölbung ihrer Mittelpartien in kleinere zerspalten.

¹⁾ S. J. Mauchly: Publ. Carn. Inst. Nr. 175, Vol. V, S. 385, 1926.

²⁾ F. J. W. Whipple und F. J. Scrase: Geoph. Mem. VII, Nr. 68, 1936.

³⁾ Grundsätzliche Darstellung der G. C. Simpsonschen Gewittertheorie in den beiden Arbeiten G. C. Simpson: Phil. Trans. Roy. Soc. (A), 209, 379—413, 1909; Proc. Roy. Soc. (A), 114, 376—401, 1927; die im folgenden mit S_I und S_{II} zitiert sind.

⁴⁾ P. Lenard: Wied. Ann. 46, 584—636, 1892.

⁵⁾ P. Lenard: Met. Zeitschr. 21, 249—262, 1904.

Die Umkehrung dessen besagt also, daß bei Aufwinden von 8 m/sec und mehr¹⁾ Regenfall überhaupt unmöglich ist und alles in der Wolke vorhandene Wasser in der Schwebelage gehalten wird. Das bedeutet also, daß in Gewittergebieten mit entsprechendem Aufwind ein und dieselbe Wassermenge in vielfacher Wiederholung die Prozesse des Tropfenzerfalls und Wiederzusammenfließens durchmachen kann, ohne durch Regenausfall merklich vermindert zu werden. Der „Betriebsstoff“ der Gewittermaschine ist also vorhanden, es fehlt einstweilen nur noch das bei dieser Art Tropfenzerfall elektrisch wirksame Agens, um auf diesem Wege den Schlüssel zur Erklärung der Gewitter- (und evtl. Niederschlags-) Elektrisierung zu finden.

G. C. Simpson (S_I) wiederholte im Rahmen seiner niederschlags-elektrischen Untersuchungen in Simla (Indien) die Lenardschen Versuche und fand das Zerfallen der Tropfen ausnahmslos von starken elektrischen Effekten begleitet, was ihm den Anlaß zur Übertragung auf die atmosphärischen Vorgänge und zur Entwicklung seines außerordentlichen anschaulichen Gewittermodells gab.

Die Erklärung dieser Diskrepanz, die Simpson zunächst einen Teil der Lenardschen Versuche für unrichtig halten ließ, wurde später von P. Lenard und seinen Mitarbeitern²⁾ darin gefunden, daß das Zerblasen der Tropfen in einem wirbellosen Luftstrom — wie er bei den skizzierten Lenardschen Versuchen angestrebt war — elektrisch unwirksam bleibt, in stark wirbelnder — wie es bei Simpsons Anordnung der Fall gewesen sein dürfte — oder stoßweise bewegter Luft dagegen Effekte bis zur Größenordnung 10^{-9} Coulomb/cm³ zeitigen kann. Gleichzeitig führten diese Versuche zu der Auffassung, daß die elektrische Doppelschicht ganz in der Wasseroberfläche liegt und die Elektrizitätsentstehung auf der Abspaltung kleinster Wasserpartikelchen aus der äußeren (negativen) Schale dieser Doppelschicht beruht, für das Beschleunigungswirkungen an den Tropfenoberflächen — sei es durch Aufprall auf ein Hindernis oder infolge stark durchgewirbelten Luftstromes — notwendig sind. Die zum elektrisch wirksamen Zersprühen von Tropfen notwendigen Schwankungen der Luftgeschwindigkeit ergaben sich für Tropfendurchmesser von 5,5 (4 bzw. 2,5) mm Radius zu 3 (6,4 bzw. 14) m/sec.

2. Ladungsentstehung und Vorzeichen in den Gewitterwolken. Vorbedingung für die Gewitterbildung — meteorologisch wie elektrisch — ist das rasche Aufsteigen feucht-warmer Luft und die damit verbundene Kondensation. Ob es sich dabei um das Aufstrudeln überhitzter Luftmassen („Wärmegewitter“) oder passives Gehobenwerden durch ein- und unterströmende Kaltluft („Frontgewitter“) handelt, ist für die elektrische Seite des Problems ziemlich bedeutungslos. Das, worauf es ankommt, sind lediglich die turbulenten Aufwärtsbewegungen, die — wenigstens in einem Teilgebiet der Gewitterwolken — 8 m/sec erreichen müssen, und die Einleitung des Niederschlagsstadiums. Wird beides als vorhanden vorausgesetzt, so ergibt sich nach G. C. Simpson (S_{II}) für ein fertig ausgebildetes Gewitter folgendes Schema (Typ eines Wärmegewitters):

Die ausgezogenen Linien sind die Stromlinien der von rechts „an-“ und in die Gewitterwolke „eingesaugten“ Luft. Mit dem Aufsteigen wird ihre Horizontalbewegung verlangsamt bei gleichzeitigem Anstieg

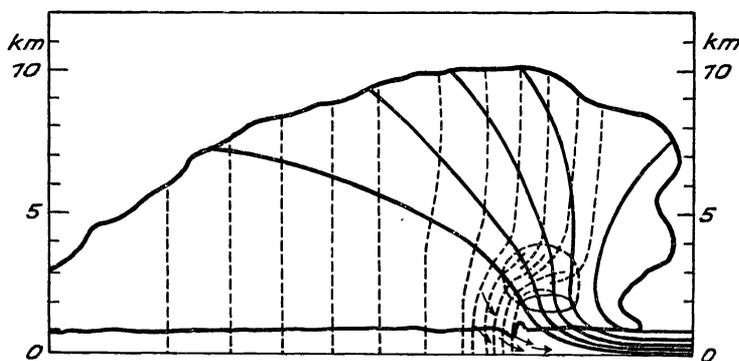


Abb. 8. Schema (Längsschnitt) der Strömungsverhältnisse in einem Gewitter nach G. C. Simpson.

der Vertikalkomponente, die in einem — in der Abbildung durch ein Oval gekennzeichnetes — Gebiet des Gewitterkopfes 8 m/sec und mehr beträgt. Mit dem weiteren Aufsteigen verteilt sich diese Luft über die Gesamtausdehnung der Wolken und verliert dabei allmählich ihre Bewegungsenergie, die sich in elektrische und sonstige Energieformen umsetzt.

Die gestrichelten Linien deuten die Fallrichtung des Niederschlags an. Das ovale Gebiet ist für den Regenfall unpassierbar. Von oben in dieser Richtung fallende Tropfen werden, wenn sie genügend klein sind, nach links abgelenkt und können seitlich des kritischen Gebietes nach unten

fallen; größere Tropfen, die in dieses Gebiet gelangen, werden zerrissen: Die kleinen negativen Trümmer werden vom Luftstrom verteilt werden, während die größeren positiven Reste weniger stark gehoben werden, wieder zusammenfließen und erneut dem Zerreißprozeß anheimfallen. Der schraffiert umrandete

¹⁾ Die Existenz solcher Aufwindgeschwindigkeiten steht nach den verschiedensten Beobachtungen an aufquellenden Cumuluswolken und in Luftfahrzeugen außer Zweifel; nach A. und K. Wegener (Vorl. über Phys. d. Atmosph. Leipzig 1935, S. 342) können sie bis zu 15 m/sec betragen.

²⁾ P. Lenard: Ann. d. Phys. 47, 463—524, 1915. O. Trübi: Diss. Heidelberg 1912. K. v. Bernolák: Ann. d. Phys. 39, 497—518, 1912. M. Aganin: Ann. d. Phys. 45, 1003—1012, 1914. E. Hochschwender: Diss. Heidelberg 1919 u. a.

Teil der Wolke ist also das eigentliche Aktionszentrum des Gewitters, das den elektrischen „Bedarf“ desselben deckt. Simpson nimmt an, daß sich dieses Gebiet, das sinngemäß gleichzeitig das positive Raumladungsgebiet des Gewitters umgrenzt, während in allen übrigen Teilen der Wolke negative Raumladung anzunehmen ist, in unseren Breiten bis zu etwa 4 km Höhe erstreckt. Zur Vereinfachung nimmt er außerdem an, daß es nicht bis zur 0° -Isotherme reicht, wie denn überhaupt die Hagelbildung im Gewittergeschehen in seinem Modell keinen rechten Platz findet.

2. Die „Polarität“ der Gewitterwolken. In Abb. 9 ist noch einmal der gleiche Schnitt wie oben dargestellt. Das umrandete Gebiet B, in dem sich das Tropfenzersprühen abspielt, ist wie schon gesagt das Gebiet positiver Raumladung — hervorgerufen durch die Anhäufung positiver grober Tropfenrümer. Durch Weiterzug (Weiterentwicklung) des Gewitters nach rechts und allmähliches Herausgleiten der groben Tropfenrümer aus B können diese als großtropfiger positiv geladener Regen zur Erde fallen. Der feine negative Wasserstrahl verläßt das Gebiet B und wird sich gemäß dem Strömungsbild (Abb. 8) über die ganze übrige Ausdehnung der Wolke verteilen. Die stärksten negativen Raumladungen sind in der näheren Umgebung von B zu erwarten, was durch die Vorzeichenhäufung in der Abbildung schematisch angedeutet ist. In den rückwärtigen Teilen der Wolke nimmt ihre Konzentration immer mehr ab.

Diese Elektrizitätsverteilung läßt bezüglich der Entladungen gewisse Erwartungen zu:

Die Zusammendrängung der hohen positiven und negativen Raumladungen, die die für die Blitzauslösung nötigen Elektrizitätsmengen enthalten, in zwei im wesentlichen übereinanderliegende Gebiete, in der Gewittervorderseite macht es wahrscheinlich, daß hier auch die Mehrzahl der Entladungen erfolgt. Da weiter im Simpsonschen Modell die Gewitterwolke sog. „negative Polarität“¹⁾ besitzt, sind 3 Arten von Blitzentladungen zu erwarten:

1. Entladungen vom positiven Aktionszentrum B nach oben („U“-Typ; „upward“) in das Gebiet A.
2. Solche von B zur Erde („D“-Typ; „downward“).
3. Solche zwischen den hinteren negativen Wolkenpartien und dem Boden („N“-Typ; „negativ“).

Da die negativen Raumladungen in den unteren hinteren Wolkenpartien nur sehr viel schwächer sein können, als in der oberen Umgebung des Aktionszentrums, müssen Entladung der letztgenannten Art sehr viel seltener sein, als die beiden anderen; das bedeutet aber, daß die von der Wolke zur Erde gehenden Blitze in der großen Mehrzahl positive Elektrizität transportieren, wie es Simpson auch annimmt und außerdem aus der Verzweigungsart von Blitzen ableitet (s. u. S. 23ff.).

4. Abschätzung der Elektrizitätsausbeute beim Simpson-Modell. Abschätzungen der Elektrizitätsausbeute beim Lenard-Effekt in Gewitterwolken sind mehrfach durchgeführt worden und ergeben, daß der Effekt zur Deckung des Elektrizitätsbedarfs eines Gewitters durchaus genügt:

Nimmt man pro Blitz die sehr hoch gegriffene Elektrizitätsmenge von 100 Coulomb an, legt nach P. Lenard einen Effekt von 10^{-9} Coul/cm³ zerstäubten Wassers zugrunde und rechnet mit einem Gesamtwassergehalt der Wolke von 1 cm³ pro cm² Basisfläche — was bei vollem Ausregnen 10 mm Niederschlag entsprechen würde —, so muß für jeden Blitz 10^{-8} Coul/cm³ Wasser entwickelt werden; dies würde bei der angenommenen Wassermenge nach zehnmaliger Wiederholung der wirksamen Tropfenzerreißung erreicht werden, was bei intensiven Aufwinden wohl in wenigen Minuten der Fall sein kann.

G. C. Simpson (S_1) geht bei seinen Abschätzungen von einer wesentlich geringeren Größe des Lenard-Effektes aus, wie er ihn bei seinen oben genannten Versuchen gefunden hatte, und nimmt pro Tropfenzerfall bei 5 mm Durchmesser $5 \cdot 10^{-3}$ Ces Ladungserzeugung (entsprechend $75 \cdot 10^{-12}$ Coul/cm³

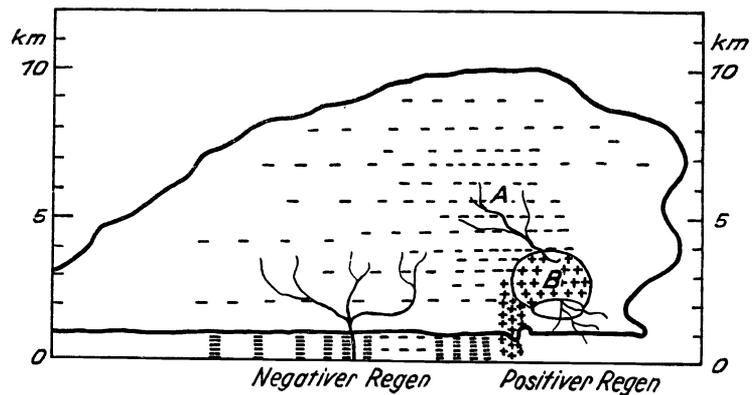


Abb. 9. Schema der Ladungs-, Blitz- und Niederschlagsverteilung in einem Gewitter nach G. C. Simpson.

¹⁾ Entsprechend einem Vorschlag von C. T. R. Wilson (s. o. a. a. O.) pflegt man Gewitterwolken, bei denen die positive Ladung oben (unten), die negative unten (oben) angehäuft ist, als „positiv (negativ) polar“ zu bezeichnen. Die Bezeichnungsweise rührt wohl daher, daß in einer positiv (negativ) polaren Wolke das Feld die normale (umgekehrte) Richtung wie das (positive) Schönwetterfeld hat.

Wasser) an. Zur Einleitung einer Blitzentladung ist ein Mindestfeld von 30 kV/cm notwendig, was nach bekannter Beziehung

$$\mathcal{E} = -4\pi\sigma$$

eine Ladungsdichte σ in einer als Ausgangspunkt des Blitzes angenommenen Begrenzungsfläche innerhalb der Wolke — etwa in der Begrenzung des B-Raumes — von rund 8 Ccs/cm² entsprechen würde. Um dies zu erreichen, müssen pro Querschnitteinheit des Aktionszentrums $8 : 5 \cdot 10^{-3} = 1600$ einzelne Tropfenumsätze stattfinden; zerfällt mit anderen Worten ein Tropfen pro cm² und sec, so wird die fragliche Feldstärke in 27 Minuten, zerfallen 27 Tropfen pro cm² und sec, so wird sie in einer Minute erreicht. Nimmt man weiter für die vertikale Erstreckung des Aktionsgebietes B 2000 m an und berechnet das bei adiabatischer Abkühlung beim Aufsteigen zur Kondensation freiwerdende Wasser eines mit 15⁰ gesättigt in B eintretenden Luftstromes, so werden auf diese Weise in 10 Min. 2,88 g oder 43 Tropfen von 5 mm Durchmesser pro cm² Fläche zur Lenard-Wirkung zur Verfügung stehen. Unter diesen in keiner Weise unwahrscheinlichen Annahmen ist also mindestens jede Minute die zum Blitzdurchbruch nötige Feldstärke erreichbar. Nimmt man zusätzlich an, daß ein Blitz nicht die gesamte, sondern nur etwa die einem km² des Raumladungsgebietes entsprechende Ladung kompensiert, so läßt sich bei entsprechendem Querschnitt des B-Raumes mit Leichtigkeit der Ladungsbedarf für Blitze in 5 und weniger Sekunden zeitlichem Abstand durch Lenard-Wirkung decken.

Eine andere Abschätzung Simpsons (S_{II}), bei der er an Stelle der Erzeugung einer bestimmten Oberflächendichte in einer hypothetischen Leiterfläche in der Wolke die Entstehung einer bestimmten räumlich verteilten Elektrizitätsmenge betrachtet und nach den hierfür notwendigen Vorbedingungen fragt, kommt im wesentlichen zu ähnlichen Ergebnissen.

Um wo die Feldverteilung in und unter einer Gewitterwolke der skizzierten Art nach Größe und Richtung abschätzen zu können, sind einige Vereinfachungen notwendig.

Zunächst seien die beiden Raumladungsgebiete A und B (Abb. 9) als kugelförmige Räume übereinander angeordnet; A habe einen Radius von 3 km und sein Zentrum in 7 km Höhe, B einen Radius von 1 km und sein Zentrum in 3 km Höhe.

Als Gesamtelektrizitätsinhalt seien in A -100 , in B $+100$ Coulomb verteilt. Es ist dem Wesen des Elektrisierungsprozesses nach klar, daß diese Mengen nicht gleichmäßig über die beiden Räume verteilt sein können. Vor allem wird im A-Gebiet die stärkste Elektrizitätsanhäufung in der Nähe des B-Gebietes, also im unteren Teil zu erwarten sein. In B wird je nach der Heftigkeit des aufsteigenden Luftstromes die stärkste Ladungskonzentration im unteren, mittleren oder oberen Teilgebiet anzutreffen sein. Als Annäherung an diese Verhältnisse unterteilt G. C. Simpson (S_{II}) jedes der beiden Gebiete mit ihren Radius R in vier einander umschließende Teilgebiete mit jeweils $\frac{1}{4}R$, $\frac{1}{2}R$, $\frac{3}{4}R$ und R km Radius und nimmt weiter an, daß sich die Raumladungsdichten in diesen wie $5^0 : 5^1 : 5^2 : 5^3$ ($1 : 5 : 25 : 125$) verhalten. Diesem Schema gemäß werden nun die folgenden 3 Fälle näher diskutiert (vgl. Abb. 10*):

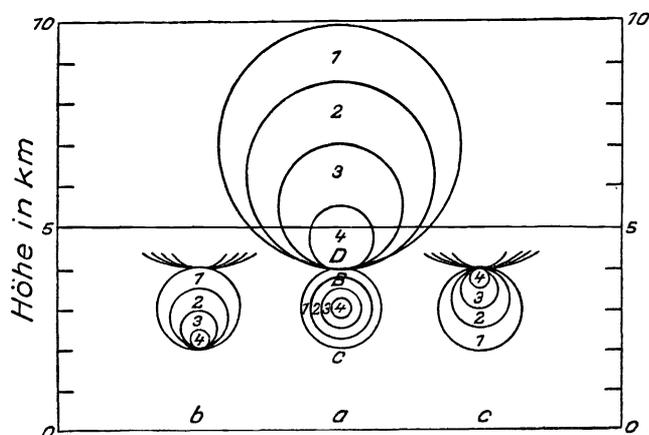


Abb. 10.

Schema zur Ladungsverteilung in Gewitterwolken.

a) Symmetrische Verteilung in B (Abb. 10a).

b) und c) Grenzfälle stärkster Ladungsanhäufung im unteren (Abb. 10b) bzw. oberen (Abb. 10c) Teil des „Lenard-Gebietes“ B.

Das Ergebnis der Feldstärkeberechnungen längs einer die Zentren von A und B verbindenden vertikalen Achse sind in Abb. 11 wiedergegeben. Danach wird im Falle a) an keiner Stelle die zur Entladungseinleitung notwendige Feldstärke von 30 kV/cm ($3 \cdot 10^6$ V/m) erreicht, während sie im Fall b) an der Unterseite, im Fall c) an der Oberseite von B sogar wesentlich überschritten wird (schraffierte Teile der Abb. 11) und über $\frac{3}{4}$ bzw. 1 km Erstreckung über diesem Wert liegt.

Damit ist die Möglichkeit von Blitzentladungen in diesem Gewittermodell erwiesen und gezeigt, daß unter

den angenommenen Voraussetzungen schon weniger als 100 Coul zur Entladung führen können. Dem oben angeführten Schema entsprechend zeitigt dieses Modell in erster Linie D- und U-Blitze.

5. Prüfung der Simpsonschen Theorie an der Erfahrung. Für die Prüfung der Simpsonschen Theorie bieten sich — wenn wir hier von den in Kap. V näher zu besprechenden Felduntersuchungen innerhalb der Wolken absehen — im wesentlichen 2 Möglichkeiten dar: Die Untersuchung der elektrischen Niederschlagsverhältnisse und die des Elektrizitätstransportes durch die Blitze.

*) Anm.: In Abb. 10 ist anstelle von „A“ versehentlich „D“ gesetzt.

Auf beiden Gebieten hat das Simpsonsche Gewittermodell sehr starken Widerspruch gefunden, der — um das kurz vorweg zu nehmen — zwar nicht zur völligen Ablehnung hinreicht, der es aber wahrscheinlich macht, daß der Lenard-Effekt nicht die alleinige Ursache der Gewitterelektrisierung sein kann.

a) Die Elektrizität der Niederschläge.

Das Simpsonsche Gewittermodell läßt folgende Niederschlagsverteilung erwarten¹⁾:

Nach der Theorie findet Elektrizitätstrennung nur beim Zerfallen der Tropfen statt. Dabei wird die positive Ladung von den Tropfen festgehalten, die negative seitens der Wolke absorbiert²⁾. Da der größere Teil des Wassers, das die positive Ladung enthält, ausregnen wird, während ein großer Bruchteil der Wolke mit der in ihr enthaltenen negativen Ladung nicht als Regen niedergeschlagen wird, so ist im Regen am Erdboden ein positiver Ladungsüberschuß zu erwarten.

Heftiger Regen wird nur durch rasch aufsteigende Strömungen verursacht; da diese Aufwinde dem Regen erst dann gestatten werden, zu fallen, wenn er vielfach den Zerfallsprozeß durchgemacht und dabei positive Ladung angenommen hat, so ist zu erwarten, daß die Hauptmenge der positiven Regenladung an heftigen Regen gebunden ist.

Negativ geladener Regen entsteht dadurch, daß negativ geladene Wolkenelemente abseits der Aufwindgebiete zusammenfließen. Dieser Regen kann nicht heftig sein; es ist also zu erwarten, daß die negative Niederschlagsladung im allgemeinen am leichten Regen gebunden ist.

Starkregen fällt in der Nähe der Aufwindgebiete. Hiersind die Wolken, die durch die aufsteigenden Strömungen verursacht werden, am tiefsten und dichtesten und enthalten am meisten von der vom Wasser getrennten negativen Ladung²⁾. Es wird also auch eine beträchtliche Menge negativ geladenen Regens aus der Wolke fallen und sich mit den positiven vermischen; es ist also zu erwarten, daß die Ladungsdichte (Ladung pro Volumeinheit Wasser) infolge dieser Vermischung in dem Maße abnimmt, wie die Stärke des Regens zunimmt.

Negativer Regen entstammt einer negativ geladenen Wolke. Wenn nun eine Wolke, die eine bestimmte Menge negativer Elektrizität enthält, aus dem Aufwindgebiet fortrückt und durch Verdampfung Wasser verliert, so kann die negative Ladungsdichte in ihrem verbleibenden Wassergehalt sehr groß werden. Wird diese Wolke nun später als Regen niedergeschlagen, so kann die negative Ladungsdichte des Regens sehr groß sein, um so mehr, als mit diesem Niederschlag kein positiver vermischt sein kann. Man kann also erwarten, daß der Regen mit der größten Ladungsdichte negativ geladen sein wird. Derartiger Regen kann nicht in der Nähe der Mitte eines Gewitters erwartet werden; er wird auf die Ränder des Gewitters und auf die am Ende eines Gewitters zurückbleibenden Wolken beschränkt sein.

Alle diese Folgerungen stehen mit den Ergebnissen der Simpsonschen Niederschlagsmessungen in Simla (Indien)³⁾ — auf Grund deren ja auch das beschriebene Gewittermodell entworfen wurde — im Einklang: Überwiegen des positiven zum negativen Niederschlag im Verhältnis 2,5 : 1 (bezüglich Regendauer) bzw. 2,9 : 1 (bezüglich der Elektrizitätsmenge), höhere Ladungsdichte bei schwachem Regen fast ausschließlich positives Vorzeichen bei Starkregen, geringes Überwiegen der negativen Ladung in der zweiten Hälfte eines Gewitterregens usw. Das Überwiegen des positiven Ladungsanteils bei Niederschlägen stand zwar zunächst im Gegensatz zu den bis dahin bekannt gewordenen älteren Messungen von J. Elster und

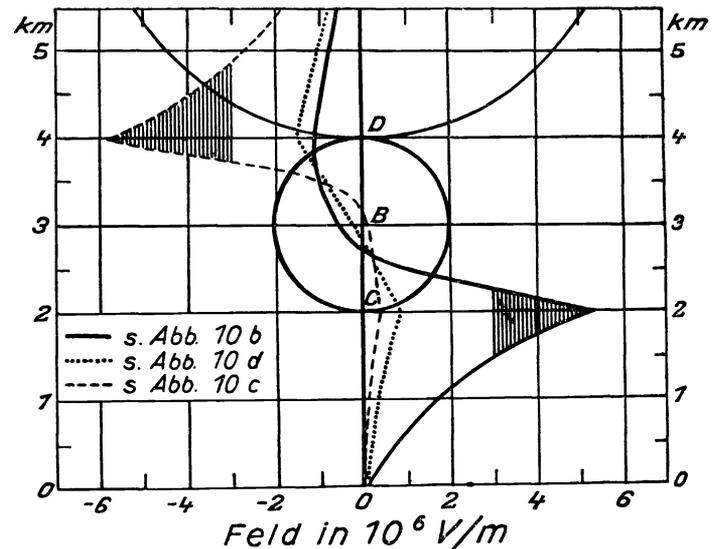


Abb. 11. Richtung und Stärke des elektrischen Feldes für die drei in Abb. 10 angenommenen Fälle der Ladungsverteilung nach G. C. Simpson. (Statt „s. Abb. 10 d“ muß es lauten „s. Abb. 10 a“.)

¹⁾ Vgl. u. a. G. C. Simpson: Phys. Zeitschr. 14, 1057—1066, 1913.

²⁾ Wie die späteren Untersuchungen von P. Lenard (a. a. O. Ann. d. Phys.) zeigten, ist die negative Elektrizität nicht, wie hier von Simpson noch angenommen, in Form leichter Träger (Ionen) ein Bestandteil der abströmenden Luft, sondern ihr vielmehr in Form kleiner und kleinster Wassertropfchen beigemischt; für die oben skizzierten Vorstellungen bedeutet das indes nur eine Richtigstellung, keine prinzipielle Änderung.

³⁾ Vollständige Daten s. G. C. Simpson: Mem. Indian Met. Dep. XX, Teil 8, 1910. Kurze Darstellung der Ergebnisse a. a. O. (Phys. Zeitschr. und in St.).

H. Geitel¹⁾, H. Gerdien²⁾ und E. Weiß³⁾, wurde aber in der Folgezeit immer wieder qualitativ bestätigt gefunden⁴⁾, wenn auch in unseren Breiten der positive Gesamtüberschuß nur selten so groß ist wie bei den tropischen Regen in Simla, und ist — mit Ausnahme des Ladungstransportes durch feste Niederschläge — heute wohl als gesichert zu betrachten. Damit wäre also von dieser Seite her eine sehr wesentliche Stütze für Simpsons Anschauung gegeben, wenn nicht F. Schindelhauer⁵⁾ auf Grund seiner mehrjährigen Niederschlagsregistrierungen in Potsdam darauf aufmerksam gemacht hätte, daß „der entscheidende Mangel der Simpsonschen Theorie in dem Umstand liegt, daß sie die Eigenelektrizität des Schnees nicht zu erklären vermag“, daß sie also nicht den ursprünglich von ihr angestrebten Anspruch auf Erklärung der Niederschlags-elektrizität als solche aufrecht erhalten kann. Auch A. Wegener⁶⁾ äußerte schon ähnliche Bedenken bezüglich der Erklärung des Wintergewitters, da in diesem Falle keine Lenard-Wirkung möglich schien. Später wurde allerdings von K. Kähler und C. Dorno⁷⁾ gezeigt, daß auch beim Zerblasen von Schneekristallen eine den Lenard-Effekt ähnliche Wirkung gleichen Vorzeichensinnes (grobe Trümmer positiv, kleine negativ) auftritt, so daß der Wegenersche Einwand nachträglich zu entkräften wäre. Ob und wie weit allerdings auch Hagel- und Graupelkörner in diesen Mechanismus passen, erscheint fraglich.

Die scharfe Polemik zwischen G. C. Simpson und F. Schindelhauer⁸⁾, auf deren Einzelheiten nicht näher eingegangen werden kann, fixiert schließlich die beiderseitigen Standpunkte dahin, daß der Anspruch auf Erklärung der Gewitteraufladungen von seiten Simpsons aufrecht erhalten wird, während Schindelhauer die Ansicht vertritt, daß zwischen der elektrischen Aufladung von Gewitterlandregen und festen Niederschlagsprodukten kein prinzipieller Unterschied gemacht werden darf und sich deshalb zugunsten der Elster-Geitelschen Influenztheorie entscheidet.

Messungen der elektrischen Ladung einzelner Regentropfen wie sie P. Gschwend⁹⁾ durchgeführt hat, haben einen weiteren Einwand gegen G. C. Simpson ergeben: Während nach dessen Schema zu erwarten ist, daß im allgemeinen bei großen Regentropfen das positive, bei kleinen das negative Ladungsvorzeichen überwiegen sollte, findet P. Gschwend im Mittel eher das Umgekehrte bei allerdings sehr häufigen und raschen Vorzeichenwechseln im Gewitterregen.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß auf diesem indirekten Weg über die Niederschlags-elektrizität keine klare Entscheidung für oder gegen das Simpsonsche Gewittermodell möglich ist. Dies gilt um so mehr, als noch zum Schluß zu erwähnen bleibt, daß alle niederschlags-elektrischen Messungen dem Einwand unterliegen, daß sich beim Fallen durch die Luft die Ladungsvorzeichen umkehren können. Nach C. T. R. Wilson (s. o. a. a. O.) ist es sogar wahrscheinlich, daß auf diese Weise je nach der Feldrichtung Vorzeichenumkehr statt hat.

b) Der Elektrizitätstransport durch Blitze.

Anm. f. d. Leser: Aus Gründen der Einheitlichkeit ist es notwendig, die den Blitz betreffenden Spezialarbeiten in einem Sonderkapitel zusammenzuziehen. Zum besseren Verständnis des Folgenden ist hier zweckmäßig der Teil des folgenden Kapitels nachzulesen, der Simpsons Vorstellung des Blitzmechanismus behandelt, d. h. S. 23 bis 26 der vorliegenden Arbeit.

Die wesentlichste Stütze für seine Gewittertheorie leitet G. C. Simpson aus einer Spezialuntersuchung über Blitzform und Blitzstromrichtung her. Zum Verständnis dessen ist es notwendig, zunächst auf die Entstehungsweise des Blitzes etwas näher einzugehen.

Um auf Grund einer Blitzstatistik eine Aussage über die von ihm postulierte Polarität der Gewitterwolken zu gewinnen, untersucht G. C. Simpson an 442 ihm zugänglichen Photographien mit insgesamt 552 Erdblitzten deren Verzweigungscharakter und kommt zu folgendem Ergebnis:

242 Blitze zeigen eine klare Verzweigung in Richtung Wolke—Erde;
3 Blitze zeigen einwandfrei das Umgekehrte;

¹⁾ J. Elster und H. Geitel: *Met. Zeitschr.* 5, 95—100, 1888; *Wien. Ber. (IIa)* 99, 421, 1890.

²⁾ H. Gerdien: *Münchn. Ber.* 1903, S. 367; *Phys. Zeitschr.* 4, 837—842, 1903.

³⁾ E. Weiß: *Wien. Ber. (IIa)*, 115, 1285—1320, 1906.

⁴⁾ K. Kähler: *Erg. Met. Beob. Potsdam* 1908, Berlin 1909; *Met. Zeitschr.* 27, 326—000, 1910; A. Baldit: *Ann. Soc. Met. France* 59, 105, 1911; *Le Radium* 9, 92, 1912; *C. R.* 152, 1911. J. A. McClelland and J. J. Nolan: *Proc. Roy. Irish Soc.* 29, 81—91, 1912; 30, 61—71, 1912; *Le Radium* 9, 277 u. 421, 1912. G. Berndt: *ref. in Met. Zeitschr.* 30, 363—366, 1913. F. Herath: *Phys. Zeitschr.* 15, 155—159, 1914 u. a.

⁵⁾ F. Schindelhauer: *Abh. d. Pr. Met. Inst.* IV, Nr. 10, 1913.

⁶⁾ A. Wegener: „*Thermodynamik der Atmosphäre*“ 1913, S. 260.

⁷⁾ K. Kähler und C. Dorno: *Ann. d. Phys.* 77, 71—80, 1925.

⁸⁾ G. C. Simpson: *Phys. Zeitschr.* 14, 1057—1066, 1913; F. Schindelhauer: *Phys. Zeitschr.* 14, 1292—1296, 1913.

⁹⁾ P. Gschwend: *Jahrb. d. Rad. u. Elektr.* 17, 61—79, 1920.

173 Blitze sind unverzweigt und
 134 Blitze zeigen „meandering and other discharges not classified above“,
 sind also unter diesem Gesichtspunkt nicht unterzubringen.

Somit zeigen also 242 Blitze (43,8%) nach der von ihm angenommenen Gleichsinnigkeit von Verzweigungs- und Blitzstromrichtung positiven Elektrizitätszufluß zur Erde und nur 3 Blitze (0,5%) das Umgekehrte. Zu den 173 unverzweigten Blitzen nimmt Simpson an, daß es hierbei z. T. ebenfalls um positive Blitze handelt, deren feine und lichtschwache Verzweigung durch Regenschleier oder Wolkenfetzen verdeckte sein können, daß also nur ein Teil von den 173 Fällen echte negative Blitze sind. Aus diesem Grund rechnet er die 173 Blitze je zur Hälfte den positiven und den negativen zu und kommt dann zu folgender Feststellung: 134 Blitze (24,8%) erlauben keine Aussage. Unter den restlichen 418 (75,7%) besitzen 328 (29,5%) die Richtung Wolke—Erde und 90 (16,2%) die Richtung Erde—Wolke; mit anderen Worten stehen mit 75% Wahrscheinlichkeit die Häufigkeiten positiver und negativer Blitze im Verhältnis 4 : 1.

Die eine der 3 Photographien der zweiten Art zeigt ein derart ungewöhnliches Blitzbild, daß sie in Abb. 12 (Tafel 1) wiedergegeben werden soll. Simpson erklärt ihr Zustandekommen so, daß die unteren Wolkenpartien, in denen die Verzweigung einsetzt, in diesem Fall offenbar so dünn waren, daß ausnahmsweise die Verästelung noch im einzelnen auf der Platte sichtbar werden konnte.

Eine andere Konsequenz des Simpsonschen Blitzmodells (s. u.) ist die, daß negative Blitze keine Tendenz zu Partialentladungen zeigen sollen. Auch dieses sieht Simpson in seinem Blitzphotomaterial insofern bestätigt, als alle Blitzaufnahmen, die Partialentladungen zeigen, deutliche Verzweigungen in Richtung Wolke—Erde erkennen lassen.

Diese Interpretation der Blitzaufnahmen durch G. C. Simpson bezüglich der Stromrichtung ist, wie spätere Untersuchungen zeigen, nicht stichhaltig. Einmal ist nach den Statistiken über die Stromrichtung in Blitzen, die aus Feldsprungmessungen gewonnen werden, und vor allem nach den direkten Blitzstrommessungen von A. Matthias (s. folg. Kap.) das Überwiegen negativer Erdblitze in unseren Breiten fraglos erwiesen. Außerdem ergeben sowohl Laboratoriumsuntersuchungen an Funkenentladungen wie auch Blitzbeobachtungen bei gleichzeitiger Stromrichtungsbestimmung von B. F. J. Schonland and T. E. Allibone¹⁾, E. C. Halliday²⁾ und J. C. Jensen³⁾, daß Funken- bzw. Blitzverzweigungen sowohl in Richtung vom positiven zum negativen Pol wie auch umgekehrt auftreten können. Nach J. C. Jensen besteht ein Unterschied nur insofern, als die Verzweigung eines Blitzes positiver Stromrichtung sehr viel feiner und vielgestaltiger ist als die eines negativen Blitzes.

Zwischenkapitel.

Die Entstehung des Blitzes.

I. Die verschiedenen Blitzformen.

Wenn die in den Wolken sich bildenden elektrischen Ladungen eine solche Größe erreicht haben, daß ihr elektrisches Feld zum Funkendurchbruch ausreicht, kommt es zur elektrischen Entladung, dem Blitz. Dieser ist also das großräumige Analogon zum Funkenüberschlag zwischen genügend geladenen elektrischen Leitern. Seine häufigste Form ist die dem elektrischen Funken entsprechende unregelmäßig-linienhafte Entladung mit oder ohne Verästelung zwischen einzelnen Wolkenteilen bzw. zwischen diesen und der Erdoberfläche. Die „Zickzackgestalt“ des Blitzes, die diesem im Volksmund zugesprochen wird, ist niemals auch nur annähernd vorhanden, ebensowenig wie beim elektrischen Funken, wie die zahlreichen Blitzphotographien zeigen; sie ist wohl auf eine optische Täuschung bei der meist sehr kurzen und sehr hellen Lichterscheinung zurückzuführen⁴⁾.

Nach einer auf F. Arago (1837) zurückgehenden Einteilung unterscheidet man 3 Arten von Blitzentladungen. Die gewöhnlichste Entladungsform ist die des „Linienblitzes“, einer meist von vielfacher Ver-

¹⁾ B. F. J. Schonland and T. E. Allibone: Nature **128**, 794—795, 1931. T. E. Allibone: Journ. Inst. EL. Eng. **82**, 513—521, 1938.

²⁾ E. C. Halliday: Proc. Roy. Soc. (A) **138**, 205—229, 1932.

³⁾ J. C. Jensen: Journ. Franklin Inst. Philadelphia **216**, 707—748, 1933.

⁴⁾ A. Gockel: („Das Gewitter“, Berlin 1925) erklärt das Entstehen dieser Täuschung „entweder dadurch, daß wir unwillkürlich systematisieren, oder, ohne unser Zutun, rein optisch dadurch, daß eine Spirale sich als gebrochene Linie auf den dunklen Hintergrund projiziert“; da spiralige Bahnen nach den Blitzphotographien nicht wahrscheinlich sind, dürfte die erstgenannte Erklärung wohl zutreffen.

ästelung schwächerer Lichtintensität — und deshalb dem geblendeten Auge in allen Feinheiten meist kaum sichtbar — umgebene Funkenentladung. Es kommt vor, daß sich der Blitz in zwei auch drei annähernd gleich helle Zweige gabelt, die an verschiedenen Stellen in den Boden einmünden, doch sind diese Fälle seltener. Die Farbe der Linienblitze ist weiß, gelblich, rötlich oder bläulich¹⁾, ihre Dauer nach dem visuellen Eindruck sehr kurz, nach photographischen Aufnahmen mit bewegter Kamera in der Größenordnung von Mikrosekunden pro Funkenüberschlag. (Über das „Nachleuchten“ und die Partialentladungen, die die Gesamtblitzdauer bis zu einer Sekunde ausdehnen können, s. u.).

Nicht weniger häufig ist die Entladungsform der sog. „Flächenblitze“. Hierbei leuchten größere Wolkenpartien oder auch nur die Umrisse einer Wolke auf. Die Farbe ist durchweg rötlicher als die der Linienblitze. Es ist bei dieser Art der Entladungen nach Augenbeobachtungen nicht zu entscheiden, ob es sich nur um das Reflexlicht von Linienblitzen handelt, die der direkten Sicht durch Wolken entzogen sind, oder ob diese Aufhellungen wirklich eine andere Entladungsart darstellen. Ohne Frage handelt es sich bei einem Teil von ihnen nur um Reflexlicht — wie es z. B. bei fernem Wetterleuchten in erster Linie der Fall sein dürfte; andererseits ist durch die Blitzspektrogramme von Kundt²⁾, die bei Linienblitzen nur die Linienspektren von Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und seltenen Gasen, bei Flächenblitzen dagegen im allgemeinen nur das Bandenspektrum des Stickstoffs zeigen — wie es übrigens auch die Büschelentladungen tun —, der Beweis erbracht, daß es sich hier in der Tat auch um eine andere Form des Elektrizitätsausgleichs in den Wolken handeln kann. Die Trennung von Linien- und wahren Flächenblitzen ist nicht sicher möglich. Über den Mechanismus der letzteren ist deshalb noch wenig abschließendes bekannt. Was sich aus einwandfreien Beobachtungen ableiten läßt, ist kurz folgendes: Ihre Entladungsdauer ist in der Regel erheblich länger, als beim Linienblitz, im Mittel etwa 0,1 Sek. Ein Donner ist nicht hörbar. M. Toepler hält die Flächenblitze für Entladungen, bei denen es nicht zur Ausbildung längerer Funkenkanäle kommt, bei denen sich vielmehr an Stellen genügender Feldstärke nur Büschel- und Leuchtfädenentladungen — analog zum Vorstadium der Gleitfunkenausbildung (s. u.) — bilden, die (möglicherweise unter Benutzung der zahlreichen Tropfen und Eiskristalle der Wolke zur Gleitführung) also im wesentlichen ein St. Elmsfeuer sehr großer räumlicher Ausdehnung darstellen. Eine ähnliche Lichterscheinung ist interessanterweise auch an der Oberfläche von Bodennebeln beobachtet worden³⁾.

Die eigenartigste Blitzform ist die der 3. Aragoschen Klasse: Der „Kugelblitz“. Es ist angesichts der Seltenheit und der rätselhaften, bis heute noch nicht recht aufgeklärten Erscheinungen nicht verwunderlich, daß diese Blitze früher lange Zeit für Täuschungen oder Phantasiegebilde gehalten wurden. Aber schon seit Arago bezweifelt man ihr Vorkommen nicht mehr; heute sind eine große Zahl verbürgter Beobachtungen solcher „Feuerkugeln“ bekannt⁴⁾, auch ist es gelungen, sie zu photographieren⁵⁾. Beschrieben werden die Kugelblitze als Kugeln oder Ovale von einigen Zentimetern bis zu einigen Metern Durchmesser, die sich langsam abwärts, parallel zu leitenden Gegenständen (elektrische Leitungen, Dachrinnen) oder auch freischwebend in Erdbodennähe bewegen; ihre Dauer kann mehrere Minuten betragen. Sie enden spurlos oder unter erneutem Übergang in eine normale Blitzentladung, aus der sie im allgemeinen auch entstehen. Über die Farbe ist nicht viel sicheres bekannt; sie wird als rötlich, weiß, auch grünlich angegeben. Ein Spektrum konnte meines Wissens noch nicht aufgenommen werden.

Den Kugelblitzen nahe verwandt und — wie man annehmen muß⁶⁾ — das Übergangsstadium zwischen ihnen und den normalen Linienblitzen sind die sog. „Perlschnurblitze“. Bei diesen löst sich die Bahn eines in der Regel vorausgehenden Linienblitzes in eine Reihe heller Kugeln („Perlen“) auf, die bis zu mehreren Sekunden bestehen bleiben können, ehe sie in sich verlöschen. Die Durchmesser der einzelnen Perlen variieren ebenso wie bei den Kugelblitzen zwischen Zentimetern und Metern; ihre Farbe ist vorwiegend weiß, auch rot und rosa.

¹⁾ Nach J. Elster und H. Geitel sollen zur Erde gehende Blitze je nachdem, ob die Erde positiver oder negativer Pol ist, mehr bläuliche oder mehr rötliche Farbe zeigen. Dallas (Ind. Met. Mem. 6, Teil VI, Kalkutta 1900) findet in Indien in den Blitzen fast alle Farben des Spektrums vertreten.

²⁾ Kundt: Pogg. Ann. d. Phys. 135, 315—326, 1868.

³⁾ Beschreibung einer diesbezüglichen Beobachtung von M. d'Abbadie s. b. A. Gockel (a. a. O.) S. 31. Dasselbst noch verschiedene weitere Beobachtungen.

⁴⁾ Eine Zusammenstellung von 29 Beobachtungsbeschreibungen von Kugelblitzen s. b. A. Gockel, a. a. O. S. 38 ff. Vgl. auch W. Brand: „Der Kugelblitz“, Hamburg 1923, und Sauter: „Über Kugelblitze“, Beilage zum Progr. d. Kgl. Realgymn. Ulm 1890 und 1892.

⁵⁾ J. C. Jensen: Physics 4, 372, 1933, Nature 133, 95, 1934 (Ref.).

⁶⁾ M. Toepler: Mitt. d. Hermsdorf-Schomburg Isolat. G. m. b. H. 1926, 743—780; Ann. d. Phys. 2, 560—635, 1900; Met. Zeitschr. 17, 543—552, 1900.

II. Die Funken- und Blitzanalysen mittels bewegter photographischer Kamera nach B. Walter.

a) Methodik.

Die ersten Versuche, die Dauer eines Blitzes zu bestimmen, gehen auf Ch. Wheatstone zurück und beruhen auf der Beobachtung einer rasch rotierenden Scheibe mit möglichst kontrastreicher radialer Musterung (Streifen, Speichen) im Lichte der Entladung. Eine Reihe von Untersuchungen dieser Art von H. W. Dove¹⁾, F. Arago²⁾, D. Colladon³⁾, Reimann⁴⁾, F. Roth⁵⁾, W. Prinz⁶⁾ u. a. führten zu den schon erwähnten Schätzungen der Funkenblitzbahn auf die Größenordnung von Mikrosekunden, zeigten aber auch schon, daß ein Blitz häufig aus mehreren solchen Einzelentladungen bestand; auch wurde die wesentlich längere Dauer der Flächenblitze auf diese Weise bereits qualitativ erwiesen. Mehr als diese orientierenden Feststellungen waren von dieser subjektiven Methode allerdings nicht zu erwarten. Wirkliche und grundlegende Erfolge der Blitzforschung erbrachte erst die Blitzphotographie, und zwar diejenige mit bewegter Kamera.

Die erste Aufnahme eines aus mehreren Teilentladungen bestehenden Blitzes stammt von H. Kayser⁷⁾. Obwohl hierbei die Kamera fest stand, markierte sich der Blitz, dessen Kanal offensichtlich durch starken Seitenwind versetzt wurde, in vier nebeneinanderliegenden Teilentladungen. Wenige Jahre später regte dann L. Weber⁸⁾ an, bei der Blitzaufnahme die Kamera zu bewegen und so die von H. Kayser zufällig erfaßte zeitliche Analyse eines Blitzes in jedem Fall zu erreichen; in der Praxis bewegte er bei der Aufnahme die Kamera von Hand so, daß die Linsenachse etwa einen Kegel beschrieb.

Um den der Weberschen Aufnahmetechnik anhaftenden Übelstand, daß bei dieser von Hand ausgeführten Kamerabewegung die Zuordnung einzelner Teilentladungen zueinander nicht ganz einwandfrei, die Zeitbestimmung nur schätzungsweise möglich war, zu entgehen, benutzte B. Walter⁹⁾ eine durch Uhrwerk um eine vertikale Achse bewegte Kamera, auf deren Platte dann das seitliche Nacheinander als paralleles Nebeneinander abgebildet wird. Eine einfache theoretische Betrachtung zeigt, daß sich bei einer solchen Anordnung das Zeitintervall dt zwischen 2 Teilentladungen, die sich im Abstand dy auf der Platte markieren, bei Brennweite f , Winkelgeschwindigkeit w und Abstand y der fraglichen Plattenstelle von ihrer zur Drehachse parallelen Mittellinie bestimmt nach der Formel

$$dt = \frac{f}{w(f^2 + y^2)} \cdot dy.$$

b) Der elektrische Funke.

Die nahe Verwandtschaft des Linienblitzes mit der elektrischen Funkenentladung zwischen metallischen Polen legt es immer wieder nahe, von deren Gesetzmäßigkeiten ausgehend die im Blitz ins Große gesteigerten Erscheinungen deuten und analysieren zu lernen. Auch B. Walter geht bei seinem Blitzstudium diesen Weg und untersucht zunächst den Entladungsvorgang bei Funken eines Induktoriums von 10 cm maximaler Schlagweite mittels bewegten photographischen Aufnahmeobjekten¹⁰⁾. Die Ergebnisse, die zum grundsätzlichen Verständnis der Blitzerscheinungen wesentlich beigetragen haben, sind kurz folgende:

In Abb. 13 (Tafel 2) sind 2 typische Entladungen dargestellt. Diese zeigen, wie zahlreiche weitere Aufnahmen die charakteristische Erscheinung, daß der elektrische Funke in der Regel nicht mit einem Schlage fertig ist — die Zeiten von der ersten Entladungsspur bis zum Überschlag betragen in den in Abb. 13 dargestellten Fällen 900 bzw. $820 \cdot 10^{-6}$ Sek —, sondern daß ihm sein „Kanal“ zuvor durch mehrere stoßweise aufeinanderfolgende und immer länger werdende Büschelentladungen gebahnt wird. Jede von diesen benutzt weitgehendst den ihr bereits von der vorhergehenden gebahnten Weg, während sie darüber hinaus ihren Weg häufig mit einem Knick fortsetzt, um entweder in einer baumartigen Verästelung zu enden, oder, wenn sie kräftig genug war, den ganzen ihr noch übrigbleibenden Weg zu überbrücken, womit dann der eigentliche Funke fertig ist. Diese Vorentladungen gehen von beiden Polen aus, sind allerdings nach der

¹⁾ H. W. Dove: Pogg. Ann. d. Phys. 5, 379, 1835.

²⁾ F. Arago: Oeuvre Compl. 2. Ausg. (Notices scientifiques) Bd. I, Paris.

³⁾ D. Colladon: Mém. de l'Inst. 88, 1879; C. R. 109, 14, 1889.

⁴⁾ Reimann: Met. Zeitschr. 6, 22—23, 1889; 7, 466, 1890.

⁵⁾ F. Roth: Met. Zeitschr. 7, 463—466, 1890.

⁶⁾ W. Prinz: Ann. Mét. Belge 14, 1903.

⁷⁾ H. Kayser: Ber. Kgl. Akad. Berlin 1884, S. 611; Wied. Ann. d. Phys. 25, 131—136, 1885.

⁸⁾ L. Weber: Ber. Kgl. Akad. Berlin 1889, S. 781.

⁹⁾ B. Walter: Phys. Zeitschr. 3, 168—172, 1902; Ann. d. Phys. 10, 393—407, 1903; Jahrb. d. Hamburger Wissensch. Anstalten 20, 1903.

¹⁰⁾ B. Walter: Wied. Ann. d. Phys. 66, 636—648, 1898; 68, 776—778, 1898 und a. a. O.

positiven Seite (oben) ganz erheblich viel länger und wesentlich mehr verästelt, als auf der negativen, so daß demnach der positiven Elektrizität bei weitem der Hauptanteil an der Ausbildung des Funkenkanals zukommt — eine von Simpson (s. u.) zur Ermittlung der Blitzstromrichtung noch stärker differenzierte Auffassung.

Die Erklärung für diese Vorgänge bei der Funkenausbildung ergibt sich auf Grund der Ionen- vorstellung daraus, daß durch das hohe elektrische Feld zwischen den Elektroden die elektrischen Ladungs- träger (Ionen) in der Luft so stark beschleunigt werden, daß sie weitere Luftmoleküle ionisieren; so kommt es zu kaskadenartiger Vermehrung der stromführenden Teilchen. Zunächst setzt dieser Effekt an den Elektroden ein und pflanzt sich immer mehr über die ganze Bahn hin fort, bis schließlich erneute lawinen- artige Steigerung des Ionisationseffektes zum Funkenüberschlag ausreicht. Mit der starken Ionisation ver- bunden sind Anregungen der Moleküle zu höheren Energieniveaus und damit die Leuchterscheinung.

Einen anderen Entladungsrhythmus zeigen die Funkenanalysen der Abb. 14 (Tafel 2). Infolge des rascheren Abreißen des Primärfunkens geht die Entwicklung zum eigentlichen Überschlag schneller und ist nicht mehr im einzelnen aufgelöst. Die Entladung selbst reißt hier aber nicht mit einem Funken wieder ab, wie in Abb. 13, sondern zeigt mehrere diskrete „Partialfunken“ verschiedener Stärke und verschiedenen Zeitabstandes. Den Grund dafür kann man in einer Art „Kondensatoreffekt“ sehen: Ebenso wie eine Ley- dener Flasche nach jeder Entladung erst wieder voll geladen werden muß, ehe sie sich aufs neue entladen kann — so daß also ihre Entladung auch bei gleichmäßigem Nachströmen von Elektrizität stoßweise er- folgen muß —, ist das entsprechende auch bei einem Induktorium, dessen Sekundärwicklung ja eine große Kapazität darstellt, zu erwarten. Um Hertzsche Schwingungen kann es sich jedenfalls hierbei nicht handeln, da die Zeitabstände der Entladungen hierfür viel zu groß und zu ungleichmäßig sind und außerdem nach der (in der Abbildung nicht erkennbaren) Form und Verteilung des Glimmlichtes alle Partialfunken gleiche Strom- richtung zeigen. Man kann eine (ergänzende) Erklärung auch darin sehen, daß infolge des Ohmschen (und wegen der inkonstanten Stromstärke auch infolge des induktiven) Widerstandes die Nachlieferung in den Funkenkanal unter Umständen eine gegenüber der Dauer eines einzelnen Überschlages große Zeit braucht. Hat sich an der Funkenstrecke — die als leitender Kanal sehr hohen Ionengehaltes inzwischen noch bestehen geblieben ist — erneut genügend Elektrizität angesammelt und damit das Entladungspotential wieder hergestellt, so erfolgt der nächste Teilüberschlag usw. Der Prozeß setzt sich bis zum endgültigen Ausgleich bzw. bis zum Absinken der Spannung auf einen zum Funkenüberschlag nicht mehr ausreichenden Betrag fort. Es bleibt noch darauf hinzuweisen, daß auch das Vordringen der Funkenvorbereitung in einzelnen diskreten Stufen in ganz der gleichen Weise aufgefaßt werden kann.

Diese und manche andere Einzelheiten der Vorgänge beim Funkenüberschlag findet man beim Blitz in entsprechender gewaltiger Vergrößerung, qualitativ aber in ganz der gleichen Weise wieder und ist so in der Lage, viele seiner Eigenschaften durch Analogieschlüsse zu deuten.

c) Der Blitz.

In den Abb. 15 bis 18 (Tafel 2) sind einige Blitzaufnahmen mit bewegter Kamera von B. Walter (a. a. O.) wiedergegeben.

Die erste Aufnahme zeigt sehr schön die Entwicklung des Blitzes aus mehreren sich vorarbeitenden Durchbruchversuchen. Nach fertiger Ausbildung des Kanals erfolgen 3 Teilentladungen in 17,7 und 48,9 · 10⁻³ Sek. Zeitabstand. Der Gesamtvorgang läuft also in weniger als 0,1 Sek. ab.

Abb. 16 zeigt mehrere gleichzeitige Blitze in geringer Entfernung voneinander. Der rechte Blitz ist ganz besonders stark verästelt. Charakteristisch ist die an mehreren Stellen verdoppelt abgebildete Ver- ästelung, was darauf hinweist, daß blindverlaufende Äste der Vorentladung auch nach der Ausbildung eines durchgehenden Kanals mehrfach von Partialentladungen durchfahren werden können. Bei dem kleinen Stückchen im linken oberen Teil der Abbildung handelt es sich offenbar um einen kurzen Wolkenblitz mit 2 Partialentladungen.

Abb. 17 zeigt eine besonders schöne Folge von 5 Partialentladungen, die um 36, 36, 28 und 144 Milli- sekunden auseinanderliegen. Auch hier ist die mehrfache Benutzung der Blindkanäle deutlich markiert, gleichzeitig aber zu erkennen, daß die Verästelungstendenz bei den späteren Teilentladungen abnimmt.

In Abb. 15 und noch deutlicher in Abb. 16 links ist ein „Nachleuchten“ der einmal durchlaufenen Funkenbahn vorhanden. Besonders klar ist diese Erscheinung in Abb. 18 zu erkennen: Die Blitzbahn wird hier in ein quergestreiftes leuchtendes Band auseinander gezogen¹⁾.

¹⁾ Ein sehr starkes, infolge Luftbewegung auf der Platte einer feststehenden Kamera sichtbar gewordenes Nachleuchten zeigt auch eine im übrigen sehr eigenartig gestaltete Blitzaufnahme von F. Klingelfuß (Ann. d. Phys. 10, 222—224, 1903).

Das Wesen dieses Nachleuchtens, in dem man zuerst ein „Nachglühen“ der in Frage kommenden Luftteilchen¹⁾ oder ein „phosphoreszenzartiges Nachleuchten“ vermutete²⁾, erkannte B. Walter³⁾ in seiner richtigen Bedeutung als „Nachströmen von Elektrizität in die durch die Hauptentladung gebildete Blitzbahn“. Für die verschiedene Stärke und verschiedene Dauer dieses Nachströmens sind verschiedene Größenordnungen des schon erwähnten „Kapazitätseffektes“ verantwortlich zu machen. Darauf deutet u. a. auch die Tatsache hin, daß das Nachströmen meist nicht sofort, sondern erst nach Überwindung einer kurzen „Erschöpfungspause“ an den eigentlichen Blitzstrahl anschließt.

III. Entstehungsweise und Einzelheiten der Blitzbahn.

Die Übertragung der beim elektrischen Funkenüberschlag beobachteten Erscheinungen auf das atmosphärische Entladungsbild führt wie oben gezeigt, in vielem zum Verständnis des Blitzgeschehens. Für die spezielle Blitzforschung stehen nun 3 Gesichtspunkte im Vordergrund:

1. Wie kommt es zur Aufhäufung der gewaltigen elektrischen Ladungen überhaupt?
2. Wie kommt die Entladung an den „räumlichen“ Elektroden in den Wolken zustande und wie verläuft sie im einzelnen?
3. Sind aus der Blitzform und seinen elektrischen Begleiterscheinungen Schlüsse auf Größe und Richtung des Ladungstransportes möglich?

Die erste Fragestellung ist Inhalt der verschiedenen Gewittertheorien und oben schon behandelt. Im folgenden stehen der 2. und 3. Punkt im Vordergrund. Beide, insbesondere der letzte sind als Kriterien zur Entscheidung über das Für und Wider der einzelnen Gewitterhypothesen benutzt worden; näheres hierüber in folgendem Kapitel.

Die Ionisation von Luftmolekülen geht normalerweise so vor sich, daß durch irgendeinen entsprechend energiereichen Prozeß ein Elektron aus dem Molekülverband herausgesprengt wird. Das Molekül (oder Atom) bleibt positiv geladen zurück, während das Elektron, das in Luft von Atmosphärendruck nicht in freiem Zustand existieren kann, sehr bald mit einem anderen Molekül (oder Atom) „rekombiniert“ und dieses, falls es positiv geladen war, neutralisiert, oder ihm, falls es keine Ladung trug, eine negative Ladung verleiht. Geht nun dieser Prozeß in sehr hohen elektrischen Feldern vor sich, so kann das Elektron bis zu seinem ersten Zusammenstoß mit einem Molekül eine derartige Geschwindigkeit erreichen, daß es bei der Kollision mit diesem nicht mehr in dessen Verband aufgefangen werden kann, sondern dank seiner Bewegungsenergie und der Abgabe eines Teiles derselben das Molekül (Atom) in einen „angeregten Zustand“ bringt (Leuchterscheinungen) oder aus diesen ein weiteres Elektron herausschlägt, mit anderen Worten also zu weiterer Ionisierung führt. Je nach der Stärke des beschleunigenden Feldes kann dies bei einer oder mehreren Kollisionen der Fall sein, auch können unter Umständen die sekundärgebildeten Elektronen ihrerseits zu neuer Ionenbildung befähigt sein usw.

a) Der Blitzmechanismus nach G. C. Simpson.

1. Wolkenblitze.

Betrachtet man nun diese dank ihrer hohen Beschleunigung „freien“ Elektronen als in sehr starken elektrischen Feldern zum normalen Ionisationszustand der Luft hinzukommende Ladungsträger, so setzt sich hier der Elektrizitätstransport zusammen aus den unter normalen Umständen bestehenden Konvektionsströmen der positiven und negativen Luftionen und dem — sich gleichzeitig kaskadenartig verstärkenden — negativen Konvektionsstrom der freien Elektronen. Da bei diesem veränderten Ionisationsprozeß praktisch kaum mehr neue negative Ionen gebildet werden, sondern nur positive Ionen und negative Elektronen resultieren, so tritt der negative Ionenkonvektionsstrom immer mehr neben den positiven Ionen- und negativen Elektronenstrom zurück und kann letzten Endes ganz vernachlässigt werden. Da weiter die Beweglichkeiten solcher Elektronen rund 100 mal größer sind als die der Luftionen, so werden sie sich in Feldrichtung mit entsprechender Geschwindigkeit bewegen und — wie G. C. Simpson grundlegend annimmt — der Entladung einen bestimmten Weg, nämlich in allen Fällen den vom positiven zum negativen Pol oder Raumladungszentrum vorschreiben. Aus diesem Gedanken heraus kommt Simpson dann zu einer eindeutigen Beantwortung der Frage „Blitzform und Stromrichtung“.

¹⁾ E. Touchet: C. R. 140, 1031, 1905.

²⁾ K. F. E. Schmidt: Elektrotechn. Zeitschr. 26, 903, 1905.

³⁾ B. Walter: Ann. d. Phys. 18, 863—866, 1905.

An Stelle der Elektroden beim Funkenüberschlag treten in der Gewitterwolke die Raumladungsgebiete (beim Wolkenblitz) bzw. ein Raumladungsgebiet und eine Plattenelektrode (beim Überschlag zwischen Wolke und Erde).

Betrachten wir zunächst den ersten Teil:

Zwei Wolkenpartien, die der Einfachheit halber als kugelförmig angenommen werden, seien mit entsprechender Raumladung angefüllt. In Abb. 19a ist das Gebiet, in dem die beiden Raumladungskugeln aneinanderstoßen, dargestellt. Die Kraftlinien verlaufen in diesem Teilstück in erster Annäherung etwa parallel. Hat das Feld genügende Höhe erreicht, so wird längs der Strecke AB in irgend einer Form eine Entladung beginnen.

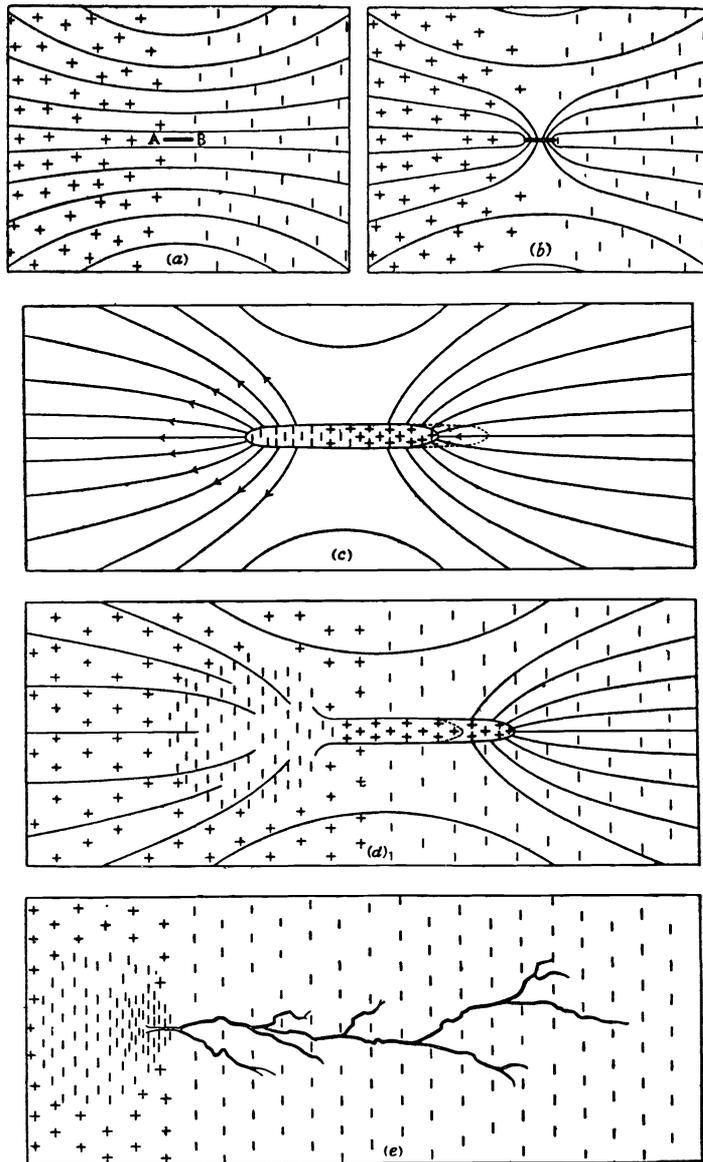


Abb. 19. Schematische Darstellung der Blitzausbildung zwischen zwei Raumladungsgebieten (Wolken) nach G. C. Simpson¹⁾.

der Blitzentstehung: 1. Die Ausbildung pflanzt sich vom positiven zum negativen Raumladungsgebiet schrittweise fort; in der umgekehrten Richtung kann sich kein Blitzkopf ausbilden, da die Elektronenwolke diesen zerfasert und auflöst. 2. Alle Verzweigungen laufen in der gleichen Richtung vom Sitz der positiven Ladung fort. Beide Tatsachen gestatten — wenn sie von der Erfahrung bestätigt werden — grundsätzliche Rückschlüsse auf die Stromrichtung in Blitzen.

2. Erdblitz

Der andere Fall des Blitzschlages zum Boden ist in analoger Weise entstanden zu denken. Seine Gestalt muß nach dem obigen sehr davon abhängen, ob die Wolke positive oder negative Ladung enthält.

¹⁾ G. C. Simpson: Proc. Roy Soc. (A) 111, 56—67, 1926; Journ. Inst. El. Eng. 67, 1269—1282, 1929.

Die Folge ist, daß jetzt die Kraftlinien gemäß Abb. 19b in dieses als leitende Verbindung aufzufassende Stück AB hineingezogen werden. Abb. 19c zeigt die Vorgänge in diesem beginnenden Entladungskanal nochmal genauer. Unter der Einwirkung des hohen Feldes sind hier freie Elektronen entstanden, die eine große Zahl positiver Ionen bilden. Der verschiedenen Beweglichkeit gemäß bewegen sich die Elektronen rasch nach links; die positiven Ionen wandern dem gegenüber nur so langsam nach rechts, daß man sie ohne das Bild zu ändern, als ruhend ansehen kann. Im nächsten Stadium (Abb. 19d) sind die Elektronen als Wolke in das positive Raumladungsgebiet eingedrungen, wo sie die ursprünglich positive Raumladung zum Teil kompensieren — evtl. bei Verlangsamung ihrer Geschwindigkeit auch zum Teil neutralisieren. Anders am rechten Ende des Kanals: Hier besteht — evtl. sogar noch verstärkt — das hohe Feld weiter, immer neue Elektronen erzeugend und in den Kanal hineinziehend, während eine der linken Seite des Bildes entsprechende Ausbreitung und Zerfaserung des Kanals wegen der geringen Beweglichkeit der positiven Ionen nicht stattfinden kann. Der Kanal verlängert sich also immer weiter in der zur Elektronenbewegung entgegengesetzten Richtung und schiebt dabei gleichsam das Feld vor sich her, wirkt also wie ein sich in das negative Raumladungsgebiet hinein verlängerndes Drahtstück. Je nach der Verteilung der negativen Raumladungen sind Verzweigungen, Blindvorstöße usw. möglich, so daß schließlich das in Abb. 19e resultierende Bild eines fertigen Blitzes zustandekommt.

Diese letzte Abbildung zeigt nochmal deutlich die beiden grundsätzlichen Eigenschaften

In Abb. 20 sind zunächst dem Schema der Abb. 19 entsprechend die verschiedenen Phasen für einen Blitz von einer positiven Wolke aus dargestellt. Die einzelnen Teilabbildungen sind nach dem Vorigen ohne weitere Erklärung verständlich. Auch hier sind die typischen Merkmale: Ausbreitung der Entladung und Verzweigungsrichtung in Richtung des bestehenden Feldes vom positiven Ladungsgebiet fort.

Anders sieht das Bild bei negativ geladener Wolke aus: In Abb. 21 ist entsprechend zu den vorigen Abbildungen nur der Kopf eines in Ausbildung befindlichen Entladungskanals dargestellt. Während dieser in den früheren Fällen von sehr starker positiver Ionisation erfüllt war und sich wie eine vorstoßende Spitze verlängerte, muß sich dessen Spitze jetzt wegen des raschen Ausströmens der Elektronen in eine sich rasch vergrößernde Elektronenwolke auflösen, sich also, um in obigem Bilde zu bleiben, selbst abstumpfen. Ein weiteres Vorstoßen des Kanals unterbindet sich von selbst dadurch, daß die Entladungsspitze in eine Büschelentladung übergeht; ein Blitz in dieser Richtung kann also, falls diese Vorstellung zutrifft, nicht zustandekommen.

Die Entladung zwischen einer negativen Wolke und dem Boden ist nur in der Weise möglich, daß der Durchbruch vom Boden aus zur Wolke hin erfolgt. Dadurch wird sein Mechanismus notwendigerweise ein ganz anderer (vgl. Abb. 22).

Während sich im Falle positiver Wolkenladungen die Entladung zum Boden hin vorarbeitet (Abb. 22 links), strömt die Elektronenwolke in das Ladungsgebiet ein und wirkt auf einen Teil desselben neutralisierend. Ist also der Blitzkanal fertig, so kann sich durch ihn zunächst nur ein Teil der Gesamtelektrizitätsmenge entladen, da die Elektronenwolke das weitere Nachströmen abriegelt. Geht ihre Zerstreung (Absorption) schneller vor sich als die Wiedervereinigung der Ionen und Elektronen im Blitzkanal, so kommt es zur nächsten Partialentladung usf. Anders im Falle des negativen Blitzes (Abb. 22 rechts). Hier muß sich der Kanal vom Boden aus entwickeln, d. h. es kommt ebenfalls zur Ausbildung einer positiven Entladung, die aber ihren Entstehungskanal (AB in Abb. 19) am Boden, und zwar sinngemäß an exponierten Stellen desselben (Türmen, Bäumen, Berggipfeln u. ä.), an denen das Feld entsprechend verstärkt ist, ausbildet. Verzweigungsmöglichkeiten für einen Blitz dieser Art ergeben sich allgemein erst beim Erreichen des Raumladungsgebietes. Der Abbildung entsprechend wird er dieses schon beim ersten Durchbruch weitgehend neutralisieren und dann mangels weiterer Speisung (infolge des raschen Feldzusammenbruches) abreißen. Ein das Entstehen von Partialentladungen begünstigender Vorgang fehlt, d. h. es bleibt bei einer einzigen unverzweigten Entladung; diese selbst ist notwendigerweise stärker und heller als ein die gleiche Elektrizitätsmenge in umgekehrter Richtung transportierender Blitz. Da seine Verzweigung in diesem Falle meist erst in der Wolke erfolgen dürfte, ist sie im allgemeinen nicht sichtbar.

Eine direkte Nachprüfung der entwickelten Gedankengänge im Laboratorium ist nicht möglich, da man die räumlichen Elektroden der Wolken hier nicht nachahmen kann und an die Verwendung metallischer Elektroden gebunden ist. Doch ergeben sich auch so einige wichtige Bestätigungen im Simpsonschen Sinne. Dies gilt in besonderem Maße von den sog. „Gleitfunkenentladungen“, auf die unten noch näher einzugehen sein wird.

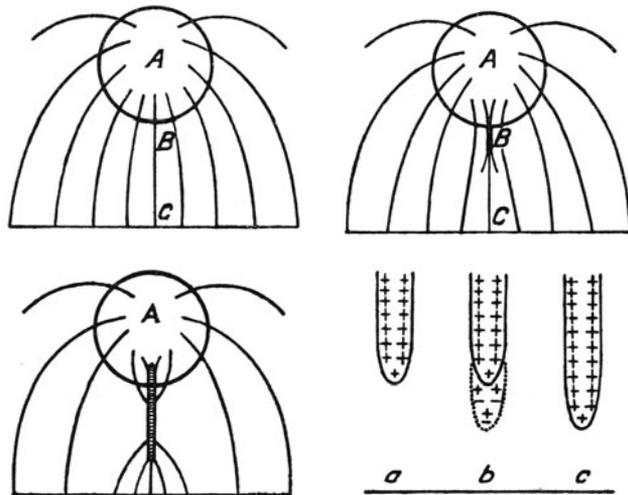


Abb. 20. Schematische Darstellung der Blitzausbildung zwischen positiv geladener Wolke und Erde nach G. C. Simpson.

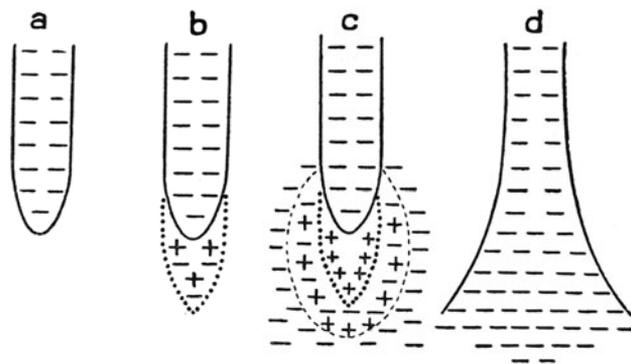


Abb. 21. Schematische Darstellung einer von einer negativen Wolke ausgehenden Entladung nach G. C. Simpson.

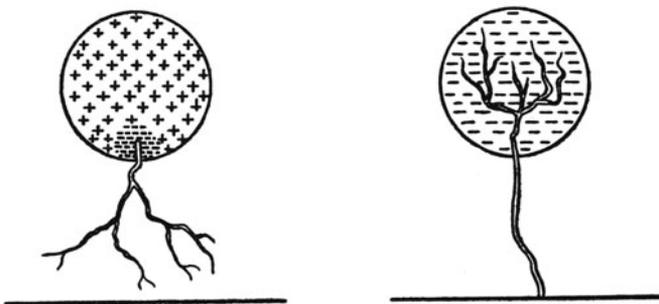


Abb. 22. Schema eines „positiven“ und „negativen“ Erdblitzes nach G. C. Simpson.

Betrachtet man ein „Gleitbüschel“ — also die sich vorschiebende Entladung, die von einer isolierenden Fläche „geführt“ wird, wie sie sich auf der photographischen Platte markiert — am positiven Pol, so zeigt dieses nach M. Toepler¹⁾ die in Abb. 23 (Tafel 3) dargestellte Form:

Vom Pol gehen eine große Zahl scharf begrenzter Leuchtfäden aus, die sich zu einzelnen Entladungskanälen mit vielfacher, vom positiven Pol wegweisender Verästelung weiterentwickeln. Ganz anders ist das Gleitbüschelaussehen am negativen Pol (Abb. 24, ebenfalls nach M. Toepler¹⁾, Tafel 3).

An Stelle der Leuchtfäden tritt ein von dunklen radialen Zwischenräumen unterbrochenes Leuchten, das deutlich die Tendenz zur diffusen Ausbreitung erkennen läßt; besonders klar tritt dies an den am Büschelrand aus einzelnen Leuchtstielen oder -punkten hervorgehenden Büscheln mit ihrer pinsel- bzw. staubwedelartigen Gestalt in Erscheinung.

Eine besonders anschauliche Abbildung der beiden verschieden aussehenden Gleitbüschel gibt G. C. Simpson²⁾ in einer in Abb. 25 (Tafel 3) wiedergegebenen Photographie der Sprühentladung zwischen zwei Polen, an die kleine Drahtstückchen angesetzt sind.

Die Erklärung dieser Erscheinungen ist die folgende: Vergegenwärtigt man sich, daß die Spannung, bei der sich die positiven Ionen wesentlich an der Stoßionisation beteiligen, höher ist als die Ionisierungsspannung durch Elektronen, so kann man sich folgende Vorstellung von der Entstehung der Figuren und ihrer polaren Unterschiede bilden. Von einem negativen Pol fliegen Elektronen aus dem Ionisationsgebiet des Spitzenstromes in das Feld und können, wenn das Feld hinreicht, längs einer weiteren Strecke durch Stoß ionisieren; für die polwärts fliegenden, durch diese Stöße gebildeten positiven Ionen muß das Feld zur Stoßionisation noch nicht ausreichen; die Leitfähigkeit in der Flugbahn der Elektronen bleibt gering, das Feld wird durch sie wenig gestört und es können sich bei weiterer Elektrizitätszufuhr neben den schon gebildeten neue Leitungsbahnen bilden, die so gebildete Figur besteht aus mehr oder weniger dicht gelagerten radialen Leuchtfäden, die Begrenzung des Ionisationsgebietes und daher der Leuchterscheinung ist verwaschen, da alle möglichen Abstufungen der Ionisationsstärke auftreten werden. Anders am positiven Pol: Hier fliegen positive Ionen in das Feld und ionisieren erst bei höherer Spannung; ist dies aber einmal erreicht, so ionisieren die dadurch neugebildeten Elektronen um so mehr beim Polwärtsfliegen und somit bildet sich gleich eine gutleitende Bahn, durch die eine größere Ladung ins Feld abfließen kann; dadurch wird die Ausbildung neuer Leitungsbahnen erschwert, die Figur bleibt auf relativ wenige Äste beschränkt und endet scharf. Infolge der größeren Leitfähigkeit der Ladungsbahnen, die wie Verlängerungen der Elektrode wirken, zeigt die positive Figur eine stärkere Wachstumstendenz (größere Geschwindigkeit), womit auch die Neigung zur Verästelung zusammenhängt.

Um neben diesen Gleitbüschelerscheinungen auch eine laboratoriumsmäßige Bestätigung seiner Anschauungen für den Überschlag durch freie Luft zu gewinnen, stellt sich G. C. Simpson (a. a. O., Phil. Mag.) folgendes Modell des Erdblitzes her: Einer Platte steht eine Kugel von 1,27 cm Radius gegenüber, die das Raumladungsgebiet der Wolke ersetzen sollen. Diese sitzt an einem rechtwinkligen Arm, dessen freies Ende als Achse parallel zur Plattenelektrode angeordnet ist, bei seiner Drehung also den Abstand Kugel—Platte vergrößert. Beide Elektroden werden mit den Polen einer Elektrisiermaschine verbunden. Beim Versuch ergaben sich nacheinander die in Abb. 26 und 27 (Tafel 3 und 4) dargestellten Entladungsformen. Alle Entladungen bei positiver Kugel zeigen das erwartete typische Bild der sich in Richtung zum negativen Pol hin verzweigenden Funkenbahnen, einerlei, ob sie diesen erreichen oder nicht. Bei negativer Kugel dagegen sind bei kleinem Abstand die Entladungen helle unverzweigte Funken. Bei Vergrößerung des Abstandes reißen sie plötzlich ab. Auf der Kugel bleibt in diesem Falle nur ein (in der Abbildung nicht sichtbares), sich in geringer Entfernung zerstreutes Lichtbüschel übrig. Entladungsvor- und zwischenstufen wie in Abb. 26 treten nicht auf³⁾.

¹⁾ M. Toepler: Ann. d. Phys. **53**, 217—234, 1917.

²⁾ G. C. Simpson: Phil. Mag. **111**, 56—67, 1926.

³⁾ Zur Deutung dieses Verhaltens ist noch etwas anderes zu berücksichtigen: Die Feldverteilung zwischen Platte und Kugel ist so, daß die Feldstärke mit der Annäherung an die Kugel zunimmt. Da nun bekanntlich die Gleitfunkenausbildung nicht im ganzen zu durchschlagenden Raum das Bestehen eines Feldes von 30 kV/cm und mehr zur Voraussetzung hat, vielmehr sein Bestehen nur an der Stelle des Entladungsbegins notwendig ist, so wird bei der obigen Anordnung der Entladungsbegins leichter an der Kugel als an der Platte erfolgen können; die positive Entladung setzt leichter und bei geringerer Elektrizitätsanhäufung ein; die negative (im Simpsonschen Sinne also die positive von der Platte aus) erfordert höheres Gesamtfeld, wird also auch in einem einzigen Überschlag größere Elektrizitätsmengen entladen. Auf die Gewitteratmosphäre angewandt, bestätigt dies ebenfalls die Simpsonsche Blitzvorstellung und macht es andererseits wahrscheinlich, daß Entladungen zu einer negativen Wolke von Punkten stark zusammengedrängten Feldes am Boden aus ihren Anfang nehmen, während solche von einer positiven Wolke zur Erde nicht unbedingt an solchen Punkten zu endigen brauchen.

IV. Der Blitzmechanismus nach M. Toepler.

M. Toepler¹⁾ geht bei seinen Vorstellungen über die Blitzbildung von Untersuchungen der sog. „Gleitentladungen“ aus. Es ist eine bekannte Erfahrung, daß dem Überschlag an einem Isolator bei allmählicher Steigerung der Spannung charakteristische Lichterscheinungen vorausgehen (Abb. 28): Wird an der Isolatoroberfläche eine gewisse Feldstärke überschritten, so bilden sich schmale, lichtschwache, bläuliche, fast geräuschlose Leuchtfäden in Richtung des Feldes. Die vorhandenen Ionen erhalten im Feld hinreichende Stoßenergie, um zahlreiche neue zu erzeugen, und speisen so die erste dem Feldausgleich dienende leuchtende Entladung.

Wird die Spannung weiter gesteigert, so entwickeln sich aus diesen ersten Leuchtfäden hellere, rötliche, beiderseits elektrodenlose Funken, die von Rauschen oder knatternden Geräuschen begleitet sind.

Nach M. Toeplers²⁾ Beobachtungen an Gleitprozessen dieser Art verwandeln sich die Leuchtfäden, wenn sie von einer gewissen Elektrizitätsmenge durchflossen worden sind, in kleine, kurze Funkenkanäle (Büschelstiele) mit fallender Charakteristik. In einem System paralleler Leuchtfäden saugt der sich zuerst umwandelnde Faden wegen der fallenden Charakteristik die Strömung der ihm benachbarten Fäden in sich hinein; diese erlöschen und es resultiert ein kurzer Funkenkanal mit beidseitigen Büscheln (Abb. 28 rechts). Mit dem Ausbilden dieser „Büschelstiele“ beginnt ein stärkerer Stromfluß; damit wird das Feld längs des kleinen Funkenkanals stark verringert; es wird an den Büschelenden zusammengedrängt, d. h. es beginnt jetzt das eigentliche Phänomen des „Gleitens“, bei dem die fortschreitende Entladung an ihren Büschelenden das zur Weiterentwicklung notwendige Feld gewissermaßen vor sich herschiebt.

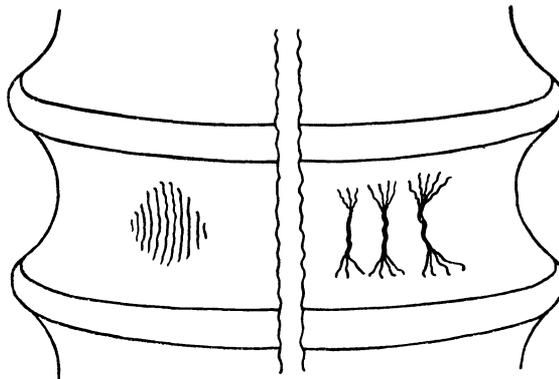


Abb. 28.

Vorstufen des Funkenüberschlages nach M. Toepler.

In ganz analoger Weise kann man sich die Entwicklung einer Blitzentladung vorstellen: In der Wolke wird es bei Erreichung genügender Feldstärke zur Ausbildung der ersten Entladungsvorläufer, der Leuchtfäden, kommen. Es ist sehr wohl möglich, ja wahrscheinlich, daß dies an den im Feld deformierten Wassertropfen (s. o. Abb. 3 und 4) bevorzugt beginnt. Die zur Leuchtfadenausbildung notwendigen Spannungen liegen durchaus im Rahmen der für die beiden geschilderten Gewittertheorien oben abgeschätzten Werte: Nach M. Toepler³⁾ herrscht bei Gleitbüscheln längs ihrer negativen Leuchtfäden ein Feld von 11,6 kV/cm, längs ihrer positiven ein solches von 5,9 kV/cm. Leuchtfäden im Raum bei der Entladung zwischen Spitzen brauchen zu ihrer Entstehung etwa 5—6 kV/cm. Es genügt also auch bei der Blitzbildung zum Weiterwachsen der Leuchtfäden ein Feld von 5—10 kV/cm; die Leuchtfäden und Büschelstiele wachsen solange weiter, wie an ihren Enden ein solches Feld bestehen bleibt.

Diese Leuchtfäden (oder sprühenden deformierten Wassertropfen) werden sich nun ebenso wie im Funkenvorstadium zu einem oder mehreren Büschelstielen zusammenziehen, deren kräftigster bzw. am günstigsten gelegener dann als „leitende Nadel“ in der Wolke die Rolle der Blitzkeimzelle übernimmt, von der aus die Weiterentwicklung ähnlich wie beim Gleitfunken im Laboratorium erfolgt. Der Ausladungsstiel verlängert sich und trägt dabei die für die weitere Bildung der Entladung notwendige Feldstärke immer weiter vor sich her. Die Entladung gleitet im Raum nach beiden Seiten vorwärts und bleibt dabei durchaus nicht auf den mit Raumladung erfüllten Raum beschränkt, sondern kann nunmehr aus der Wolkenschicht heraus in den ursprünglich raumladungsfreien Teil oberhalb und unterhalb der Wolke vordringen. Ursprung der Blitzentladung ist also ein Punkt in den Wolken. Die geringen Unebenheiten an der Erdoberfläche spielen dabei für den Zustand an diesem hochgelegenen Punkt überhaupt keine Rolle. Wie weit die Entladung in den ursprünglich raumladungsfreien Raum hineinwächst, hängt dabei einzig und allein von der in der Wolke ursprünglich vorhandenen Feldverteilung, ihrem Ladungsinhalt, ab. Je weiter sie sich von der Wolke entfernt, um so stärker wird sie abgebremst und wird schließlich irgendwo im Raum aufhören. Das trifft besonders für die oberen Teile der Blitzbahn zu, die mehr oder weniger immer die Neigung haben werden, sich an die mit Raumladung erfüllte obere Wolkenschicht anzulehnen. Der nach unten herausschlagende Ladungsteil dagegen erfährt durch das Vorhandensein der Erdoberfläche eine gewisse Richtwirkung, die ihn auf die Erdoberfläche zuzieht.

¹⁾ M. Toepler: Mitt. d. He.-Scho. Isol. GmbH. 1926, Heft 25, 743—780.

²⁾ M. Toepler: Ann. d. Phys. 53, 217—234, 1917; Phys. Zeitschr. 22, 59, 1921.

³⁾ M. Toepler: Arch. f. Elektrotechn. 10, 157—185, 1921.

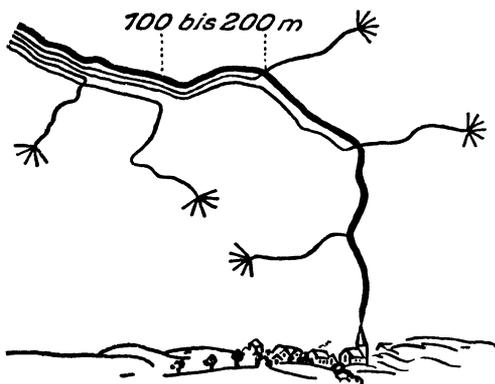


Abb. 29. Schematische Darstellung der Blitzentwicklung in einzelnen Ruckstufen nach M. Toepler (a. a. O.).

Da nach B. Walters (a. a. O.) Funken- und Blitzphotographien dem Durchbruch eines fertigen Blitzes eine Reihe verschieden weit vorschießender Vorentladungen vorausgehen, so dürfte der ganze Vorgang etwa das in Abb. 29 dargestellte Aussehen haben: Stufenweises Vordringen des Entladungskanals bis zu einem Endbüschel, in dem das Feld zur Weiterentwicklung zunächst nicht mehr ausreicht, bis zum endlich erfolgenden Durchbruch.

Es kann nicht überraschen, daß in den zahlreichen Blitzaufnahmen diese Endbüschel mit ihren Leuchtfäden, die eine Länge von vielen Metern besitzen müssen, niemals sichtbar werden, denn sie sind im Vergleich zur Helligkeit des Funkenkanals viel zu lichtschwach, um neben diesem auf der Platte erkannt zu werden. Nur bei Gleitfunken im Laboratorium gelingt es, sie sichtbar zu machen.

Andererseits ist die Kenntnis der mittleren Länge l_0 dieser Endbüschel beim atmosphärischen Entladungsvorgang außerordentlich wichtig zur Bestimmung des Spannungsverlaufes längs Blitzen. Nach M. Toeplers Messungen an Gleitfunken ist die Spannungsdifferenz zwischen dem Ende der Funkenkanäle des vorstoßenden Gleitprozesses und dem Gleitpol (Abstand L), dem Ursprungsort der Entladung, je nachdem, ob diese unverzweigt, verzweigt oder stark verzweigt stattfindet, gegeben durch die Beziehungen

$$\begin{aligned} \text{verzweigt:} & P = (5,9 \text{ bzw. } 11,6) \sqrt[3]{l_0^2} \sqrt[3]{L} \\ \text{stark verzweigt:} & P = (5,9 \text{ bzw. } 11,6) \sqrt[4]{l_0^2} \sqrt[4]{L} \\ & P = (5,9 \text{ bzw. } 11,6) \sqrt[5]{l_0^2} \sqrt[5]{L} \end{aligned}$$

(die erste Zahl gilt jeweils für positiven, die zweite für negativen Gleitfunken).

Um das l_0 im Blitzvorgang bestimmen zu können, geht M. Toepler angesichts des Versagens der photographischen Ermittlung folgenden Weg: Jeder Perlschnurblitz besitzt, wie bekannt, eine Reihe gleich großer äquidistanter Leuchtmassen. Nach seiner Ansicht besteht nun Ursprung und Wesen der Perlen darin, daß der bahnbildende Wachstumsprozeß durch Aneinanderreihung gleichgroßer Einzelbüschel bzw. Ruckstufen erfolgt. Im Perlschnurblitz werden nun die lichtschwachen, sonst unsichtbaren Ruckstufen nach Toepler dadurch sichtbar, daß bei länger dauerndem Elektrizitätsnachfließen am Ort jeder Ruckstufe infolge des dort erhöhten Ionengehaltes sich ein verstärktes Leuchten ausbildet. Der Abstand zweier Perlen würde demnach der gesuchten Entfernung l_0 entsprechen.

In einem Perlschnurblitz vom 8. 5. 1916 in Dresden ermittelte M. Toepler¹⁾ diesen Perlenabstand zu etwa 7,5 m. Nach einer anderen Beobachtung eines solchen Blitzes ergab sich der Wert 7—11 m²⁾.

Unter der Annahme eines $l_0 = 7,5$ m läßt sich nun die Gefällesumme zwischen den Blitzenden abschätzen. In der folgenden nach M. Toepler (He.-Scho. Mitt.) wiedergegebenen Tabelle ist dies für verschiedene Blitzlängen geschehen:

Tabelle. Spannung zwischen den beiden Blitzenden, berechnet für 5 kV/cm im $l_0 = 750$ cm langen positiven Kopf und 10 kV/cm im $l_0 = 375$ cm langen negativen Kopf des Blitzes in Millionen Volt.

| Blitzlänge | 1 km | 2 km | 4 km | 8 km |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| Blitz unverzweigt | 30,4 | 38,3 | 48,3 | 60,8 |
| Blitz verzweigt | 21,4 | 25,5 | 30,2 | 36,0 |

Da längs der Funkenbahn kein hohes Gefälle existieren kann, schiebt diese, wie schon gesagt, das Feld, das sich an ihren Büschelenden zusammendrängt, vor sich her. Die Feldverteilung um einen herabfahrenden Blitz hat also etwa das in Abb. 30 skizzierte Aussehen.

¹⁾ M. Toepler: Abh. Isis, Dresden 1916; Met. Zeitschr. 34, 225, 1917.

²⁾ M. Toepler: a. a. O. (He.-Scho. Mitt.).

Diese in der Auffassung des Blitzes als Gleitfunkenvorgang begründete Vorstellung ist besonders wichtig aus folgendem Grund: Die normale Anschauung der Funkenbildung zwischen 2 Elektroden verlangt zwischen diesen die Existenz der Durchbruchfeldstärke von 30 kV/cm. Beim Gleitprozeß ist dies nicht im entferntesten notwendig, wie die obige Tabelle zeigt; hiernach genügt z. B. für einen 8 km langen unverzweigten Blitz ein gleichmäßig über seine Gesamtlänge verteilt gedachtes Feld von 75 kV/m. Notwendig ist nur ein Feld von 5—10 kV/cm am Ursprungsort des Blitzes und eine genügende Elektrizitätsmenge, die ihn speist bzw. seinem Vordringen in den nicht mehr von gleich hohen Raumladungen besetzten Raum zwischen Wolke und Erde die nötige Stoßkraft verleiht. Gemäß Abb. 30 steigt dann bei seiner Annäherung an den Boden hier das Feld außerordentlich an, um im Moment des Einschlages zusammenzubrechen.

Diese Erscheinung starken Feldanstieges unmittelbar vor dem Blitz ist kürzlich in den Arbeiten von H. Heinze¹⁾ und H. Wichmann²⁾ untersucht und bestätigt worden. Die Erklärung, die H. Wichmann dafür in dem Auftreten plötzlicher, in ihrem Wesen durchaus hypothetischer Aufladungsvorgänge innerhalb der Wolke und deren blitzauslösender Wirkung sehen will, ist angesichts der Toeplerschen Vorstellung nicht notwendig. Zudem ist bei den genannten Untersuchungen die zeitliche Zuordnung von Blitzbild und Feldsprung nicht genau genug, um hieraus die zeitliche Aufeinanderfolge von Feldänderungen und Blitzvorstößen sicher ableiten zu können.

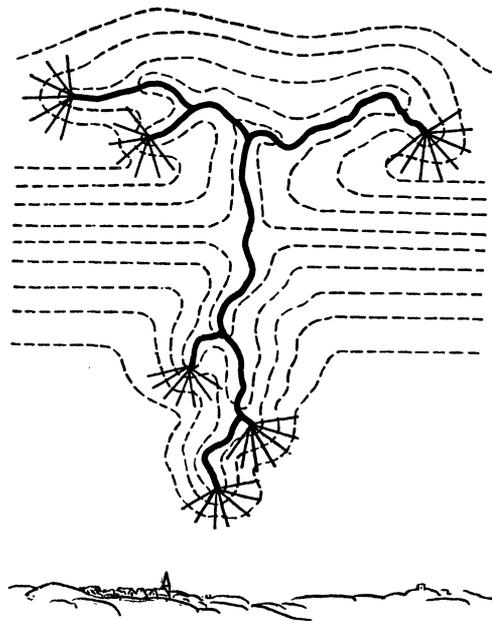


Abb. 30. Das elektrische Feld in der Umgebung eines Blitzes nach M. Toepler.

V. Die Blitzanalysen von B. F. J. Schonland und Mitarbeitern.

a) Analysetechnik.

Die besten Kenntnisse der Vorgänge in der Blitzbahn verdanken wir den ausgedehnten Untersuchungen von B. F. J. Schonland und Mitarbeitern in Cape Town und Johannesburg (Südafrika). Mittels der sog. „Boys-Kamera“³⁾ konnten diese die zeitliche Aufeinanderfolge im Blitzgeschehen bis auf Mikrosekunden genau verfolgen und damit den Blitzvorgang in ein System charakteristischer und ganz verschieden gestalteter Entladungsarten zerlegen.

Das Prinzip der Boys-Kamera ist so, daß zwei in bestimmten Abstand voneinander (etwa 10 cm) in der Objektivenebene montierte Objektive in dieser Ebene mit 1500—3000 Umdrehungen pro Minute um ihren gemeinsamen Schwerpunkt rotieren. Bei einer anderen Ausführungsform der Kamera stehen die Objektive fest; ihre Bilder werden durch Prismen nach oben und unten auf die Innenseite einer mit Film ausgekleideten, rasch rotierenden Trommel abgebildet. Auf beiden Wegen entstehen von jeder Entladung 2 Bilder, auf denen sich das zeitliche Nacheinander in umgekehrter Reihenfolge markiert. In Abb. 31 (Tafel 4) ist eine solche Aufnahme dargestellt; zusammengehörige Teile sind durch Buchstaben gekennzeichnet. Schneidet man jetzt entsprechende Teilbilder einer solchen Aufnahme aus und stellt sie nebeneinander (vgl. Abb. 32, Tafel 4), so erhält man auf diese Weise 2 Bilder, auf denen das zeitliche Fortschreiten nach entgegengesetzten Seiten erfolgt. Man hat jetzt durch Messung des linearen Abstandes korrespondierender Punkte der beiden Bilder die Möglichkeit, ihre zeitliche Aufeinanderfolge mit großer Genauigkeit zu bestimmen. Durch Verwendung eines Komparators für diese Ausmessungen erzielen B. F. J. Schonland und Mitarbeiter eine Genauigkeit der Zeitfixierung bis auf etwa eine Mikrosekunde genau⁴⁾.

Abb. 32 läßt bereits ein aus zahlreichen Blitzanalysen immer wieder ermitteltes Charakteristikum der Entladung erkennen: Die spiegelbildliche V-artige Gestalt der beiden Teilbilder besagt, daß eine einleitende schwache Entladung von oben nach unten (in den Bildern einander zugekehrt), bei Erreichung des Bodens von einer wesentlich lichtstärkeren und schnelleren Entladung vom Boden nach oben gefolgt wird.

¹⁾ H. Heinze: Ann. d. Hydr. 64, 129—143, 1936.

²⁾ H. Wichmann: Aus dem Archiv d. Dt. Seewarte 58, Nr. 10, 1938.

³⁾ C. V. Boys: Nature 118, 749, 1926; 122, 310, 1928.

⁴⁾ B. F. J. Schonland and H. Collens: Proc. Roy. Soc. 143, 654—674, 1934.

also $\frac{1}{30}$ der Lichtgeschwindigkeit, die letztere gemäß den einzelnen „Erholungspausen“ nur etwa $2 \cdot 10^7$ cm/sek. Diese Tatsache, daß die Vorstoßgeschwindigkeit des Kanalkopfes rund 50 mal geringer ist als die Geschwindigkeit eines Einzelvorstoßes, führt B. F. J. Schonland zu der Annahme, daß diese letztere durch eine besondere, während der ganzen Kanalausbildung von der Wolke zur Erde fließende Strömung veranlaßt wird, für die er die Bezeichnung „Lotsenströmung“ („pilot-streamer“) wählt. Diese photographisch allerdings nicht nachgewiesene Strömung soll die Einzelvorstöße in die jungfräuliche Luft hinein „lotsen“; ihre Geschwindigkeit soll gleich der Kanalvorstoßgeschwindigkeit sein.

B. Walter¹⁾, der kürzlich die Schonlandschen Ergebnisse näher diskutiert, hält diese Auffassung einer die Einzelvorstöße tragenden und leitenden Lotsenströmung nicht für zutreffend, da nach seinen früheren Untersuchungen²⁾ eine solche nur in Frage kommt für das jeweilige kurze, in Abb. 35 verdickt gezeichnete, hellere Stück eines jeden Vorstoßes, das also wirklich in jungfräuliche Luft hinein eindringt, während im jeweiligen oberen Teil des Vorstoßes das schon vorionisierte Stück der Bahn benutzt wird, in dem eine solche Lotsenströmung nicht mehr notwendig ist. An Stelle der Schonlandschen Vorstellung ist es also wohl richtiger, anzunehmen, daß im jeweiligen unteren, helleren Stück des Einzelvorstoßes die Geschwindigkeit geringer ist als im oberen lichtschwachen Stiel; das linke Teilstück der Abb. 35 wäre demnach richtiger in der folgenden Weise darzustellen:

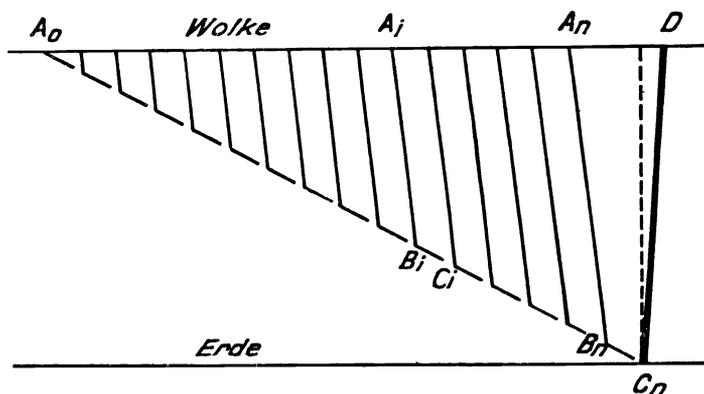


Abb. 36. Schematische Darstellung der Geschwindigkeiten der elektrischen Strömung in den Vorentladungen und der Hauptentladung der ersten Teilentladung eines Blitzes nach der Auffassung von B. Walter.

(Gleichzeitig ist in dieser Darstellung ein Fehler der Abb. 35 berichtigt, insofern die Vorentladungen nicht wie dort als vertikale Linien, sondern ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit gemäß geneigt dargestellt sind.) Im i -ten Vorstoß würde demnach das Stück A_1B_1 mit der Geschwindigkeit $1 \cdot 10^9$ cm/sek, das Stück B_1C_1 (und damit der ganze Kanal) mit der Geschwindigkeit $2 \cdot 10^7$ cm/sek durchlaufen. Man muß sich bei dieser Darstellung natürlich bewußt bleiben, daß der Knick bei H_1 nicht etwa räumlich reell ist, sondern nur eine Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit andeuten soll.

Eine wesentliche Stütze für seine von der Schonlandschen abweichende Auffassung sieht B. Walter in dem Umstand, daß das unterste in noch nicht vorionisierte Luft vorstoßende Stück einer jeder Vorentladung heller aufleuchtet als sein Stiel. Da dieser in vorionisierter, also weniger Widerstand bietender Bahn verläuft, ist hier die Stromwärme kleiner als im Vorstoßstück, das Aufleuchten thermisch angeregter Moleküle also schwächer als in letzterem. Außerdem beruht die Verzweigungstendenz an den in Abb. 36 mit B_1 bezeichneten Stellen darauf, daß hier die wesentlichsten Schwierigkeiten für das Vorstoßen der Entladung bestehen.

Während man nun bisher annahm, daß in einem einmal fertig ausgebildeten Blitzkanal die verschiedenen Teilentladungen ohne weitere Vorbereitungen passieren können, ist diese nach Schonland und Mitarbeitern nicht der Fall. Vielmehr geht jeder Teilentladung noch eine Vorentladung von der Wolke zur Erde voraus (vgl. Abb. 35). Diese späteren Vorentladungen, die den bereits durchlaufenen und im Absterben begriffenen Blitzkanal gewissermaßen neu auffrischen und zur nächsten Hauptentladung befähigen, verlaufen nun ganz anders als die Vorbereitungsentladungen in die jungfräuliche Luft: Sie durchsetzen den Kanal mit sehr hoher Geschwindigkeit ($0,2$ — $2 \cdot 10^9$ cm/sek) geschoßartig in einem Zuge („dart-streamer“) und leiten mit Erreichung des Erdbodens den Hauptschlag ein.

Die Geschwindigkeit dieser späteren Vorentladung scheint von der Zeitdifferenz zwischen ihnen und der letzten vorausgegangenen Hauptentladung abzuhängen, doch ist das angeführte Zahlenmaterial

¹⁾ B. Walter: Ann. d. Phys. **34**, 644—664, 1939.

²⁾ B. Walter: Ann. d. Phys. **10**, 393—407, 1903; Jahrb. Hamb. Wiss. Anst. **20**, 1903 u. a. a. O.

(B. F. J. Schonland, D. J. Malan und H. Collens, a. a. O. Tab. 8 S. 607) nicht sehr überzeugend. B. Walter (a. a. O.) bemerkt zu diesem Punkt, daß diese Unstimmigkeiten sich vermutlich dadurch aufklären, daß für die Geschwindigkeit der Entladung in einem vorhandenen Kanal, die nach A. Cravath und L. B. Loeb¹⁾ *et. par.* von der Anzahl der in der Bahnlinie noch vorhandenen freien Elektronen abhängt, außer dem zeitlichen Abstand zur vorhergehenden Entladung auch noch dessen Intensität maßgebend sein muß, da nur beides zusammen die restliche Elektronenzahl der Bahn bestimmen kann.

Die verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der ersten und der späteren Vorentladungen erklären sich aus den verschiedenen Bedingungen beim Entladungsvorstoß in jungfräuliche Luft und in einen schon vorhandenen Kanal. Für letzteren führt die Vorstellung von A. Cravath und L. B. Loeb des Elektrizitätstransportes in Gestalt einer Elektronenlawine zur richtigen Größenordnung von 10^9 cm/sek (s. Anm. 1). Das gleiche gilt übrigens auch für die größenordnungsmäßig ähnliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Hauptentladungen (s. u.). Für die erste Entladungsbildung, die rund 50 mal langsamer vor sich geht, muß ein anderes Gesetz gelten, da hier die freien Elektronen, die die Ladung tragen, erst gebildet werden müssen. Schonland benutzt hierfür die elektronentheoretisch begründete Formel

$$V = \sqrt{2 E e \lambda / \pi m}$$

wo E die zur Entladungseinleitung nötige Spannung (30 kV/cm), λ die mittlere freie Weglänge des Elektrons in Luft ($3,8 \cdot 10^{-5}$ cm) und e und m Ladung und Masse des Elektrons bedeuten. Danach berechnet sich ein $V = 3,6 \cdot 10^7$ cm/sek, also ebenfalls die richtige Größenordnung²⁾).

Wenn nun die Vorentladung ("leader-stroke") — als "step-streamer" in der ersten oder als "dart-streamer" in den späteren Teilentladungen — den Boden erreicht und damit der Blitzkanal fertig ausgebildet

bzw. wieder aufgefrischt ist, dann erfolgt von unten nach oben gehend die Hauptentladung ("main-stroke"). Ihre Geschwindigkeit ist sehr groß: $5 \cdot 10^9$ cm/sek (also rd. $\frac{1}{6}$ der Lichtgeschwindigkeit) und mehr. Im Gegensatz zur Vorentladung, die längs der ganzen Bahn gleiche Helligkeit zeigt, nimmt die Helligkeit der Hauptentladung von unten nach oben ab. Besonders krasse, stufenartige Helligkeitsabnahme zeigt sich an den Stellen, wo der Rückschlag auf eine Verzweigungsstelle der Bahn trifft, wie das in Abb. 37 (Tafel 4), die einige der Schonlandschen Aufnahmen wiedergibt, deutlich zu erkennen ist. Noch klarer tritt das ganze Verhalten der Hauptentladung in der nächsten Abb. 38 zutage, in der im gleichen Schema wie in Abb. 35, also mit von links nach rechts verlaufender Zeitskala, die Blitze 70 und 65 in ihrem wahren Ablauf dargestellt sind (die Buchstaben beziehen sich auf Bahnpunkte, für

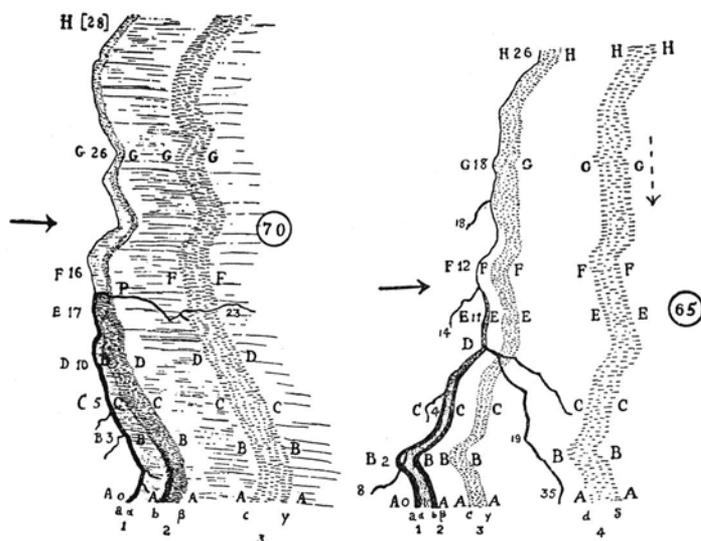


Abb. 38. Verlauf der Strömung in der Hauptentladung der Blitze 70 und 65 nach Malan und Collens (a. a. O.).

die Zeitbestimmungen ausgeführt wurden). Die verschieden starke Schraffur gibt Stärke und Zeitdauer des sog. „Nachleuchtens“ an. Man hat also nach diesem Verhalten den Eindruck, daß der Elektrizitätsfluß im Rückschlag nur zu einem Teil die Wolke erreicht, während ein merklicher Prozentsatz von den Verzweigungskanälen aufgesogen wird.

¹⁾ A. Cravath und L. B. Loeb: *Physics* **6**, 125, 1935. Die Geschwindigkeit V einer als Elektronenlawine aufgefaßten Entladung berechnete sich danach zu $V = n^{1/2} \cdot v \cdot d$, wo n die Elektronendichte, v ihre Geschwindigkeit im herrschenden Feld und d die Längserstreckung der mit dem Entladungskopf vorgeschobenen Elektronenlawine ist. Unter plausiblen Annahmen von $n = 1000$, $d = 6$ cm und einem mittleren Feld von 90000 Volt bis in 3 cm Abstand vom Entladungskopf berechnet Schonland hiernach eine Geschwindigkeit von $1,03 \cdot 10^9$ cm/sek. — Vgl. hierzu auch die Stellungnahme von A. Cravath und L. B. Loeb: *Phys. Rev.* (2) **47**, 259—260, 1935.

²⁾ Wahrscheinlich ist nach Schonland der nach der Formel berechnete Wert zu hoch, da nach O. Klemperer („Elektronentechnik“, Springer 1933, S. 290) die freie Weglänge zu hoch angesetzt und außerdem die stillschweigende Annahme nur unelastischer Zusammenstöße zwischen Elektron und Molekül nicht streng erfüllt sein dürften. Beide Korrekturen lassen ein V zwischen $1,4$ und $1,8 \cdot 10^7$ cm/sek besser erscheinen, was sich den gemessenen Werten auch besser anschließt.

³⁾ B. Walter weist darauf hin, daß bei seinen früheren Funkenanalysen die Wachstumsgeschwindigkeit in jungfräuliches Gebiet wesentlich kleiner gefunden wurde ($3 \cdot 10^3$ cm/sek für positive und weniger als die Hälfte für negative Polbüschel) und zweifelt deshalb die Gültigkeit dieser Formel an. Erwähnt sei hierzu jedoch, daß auch Toepler für die Geschwindigkeit des Ruckstufenwachstums die gleiche Größenordnung wie Schonland findet.

Die Erklärung für dieses Geschehen in der Hauptentladung, das Schonland und Collens zunächst (a. a. O. 1934) durch thermische Ionisation im Entladungskanal zu deuten versuchten, ergibt sich nach der Ansicht von B. Walter¹⁾, der sich Schonland und Mitarbeiter später ebenfalls anschlossen, in folgender Weise: Durch die Vorentladungen wird, da diese offenbar als Gleitprozesse verlaufen — wofür auch die Gleichheit der Gleitfunken- (Toepler) und der Blitzkanal-Vorstoßgeschwindigkeit (Schonland) von rund 10^7 cm/sek spricht —, ein hohes Feld bis zum Erdboden vorgetrieben, ein Vorgang, der eine entsprechende Anhäufung von Influenzladung an der Einschlagstelle und ihrer Umgebung zur Folge hat. Im Augenblick, wo die Vorentladung den Boden erreicht, bricht dieses Feld am Kanalkopf weitgehend zusammen, die Influenzladung wird frei und fließt im fertigen Kanal zur Wolke hin ab. Ist nun, wie es in der großen Mehrzahl der Fälle zuzutreffen scheint, die Wolke der negative „Entladungspol“, so ist der ganze Vorgang jetzt folgendermaßen zu denken (Abb. 39):

Aus dem negativen Raumladungsgebiet bricht an einer Stelle eine Vorentladung nach unten durch, die sich in eine Reihe einzelner Verzweigungen spaltet — diese mit beträchtlichen negativen Ladungsmengen füllend (Abb. 39a) — und mit einem Zweig sich dem Boden nähert (Abb. 39b). Hier tritt durch Influenz eine starke Vermehrung der positiven Ladung ein, die dann nach vollendetem Durchbruch in diesen zurückströmt (Abb. 39c) und ihn samt seinen Seitenkanälen bis zur Wolke hinauf entlädt. Die Stromrichtung ist also, um darauf noch mal gesondert hinzuweisen, in beiden Teilphasen die gleiche, der Blitz also, wie auch aus anderen Untersuchungen bekannt, ein aperiodischer Vorgang.

In den weiteren Teilfiguren der Abb. 39 ist das gleiche für eine spätere Teilentladung desselben Blitzes skizziert: Die unmittelbare Umgebung des Blitzursprunges ist durch die erste Teilentladung weitgehend neutralisiert, der Kanal als solcher aber noch vorhanden (Abb. 39d). Bis zur Entladungsvorbereitung zum nächstgelegenen Ladungszentrum in der Wolke vergeht eine gewisse Zeit — die Pause bis zur nächsten Partialentladung —, dann erfolgt in gleicher Weise eine zweite Entladung, bestehend aus negativer nach unten vordringender Vorentladung (Abb. 39e) und Rückwärtsströmen der positiven Influenzladung (Abb. 39f). Da die Vorentladung hierbei einen, wenn auch im Absterben begriffenen Kanal benutzen kann, ist eine Verzweigungstendenz kaum mehr vorhanden. In dieser Weise geht der Vorgang — meist mit immer länger werdenden Erholungspausen (vgl. z. B. Abb. 17 auf Tafel 2) — bis zur Erschöpfung der betreffenden Wolkenpartie weiter.

In Abb. 38 war zu erkennen, daß auch die Hauptentladung nicht, wie man nach dem bisherigen vielleicht erwarten sollte, in einem einzigen Zuge erfolgt, sondern verschiedenes langes Nachleuchten und in diesem verschiedene Stärke zeigt, die gelegentlich sogar an eine Hauptentladung in mehreren zeitlich eng zusammenliegenden Stufen denken läßt. Zu einem klaren Verständnis dessen kommt man nach B. Walter (a. a. O. 1939) durch die Berücksichtigung des Umstandes, daß der Erdboden einen schlechten Leiter darstellt, daß also der Zufluß der zum Rückströmen fähigen und fälligen Influenzladung gewisse Zeit beansprucht. Je nach dem Leitfähigkeitszustand des Bodens wäre demnach ein verschiedenes langes Nachströmen in der Hauptentladung zu erwarten — eine Hypothese, für die B. Walter in einer Photographie einer z. T. in Land, z. T. in Wasser endigenden Blitzbahn eine direkte Bestätigung sieht²⁾. Blitzaufnahmen mittels bewegter Kamera über Land und über See wären zur weiteren Prüfung dieser Arbeitshypothese sehr erwünscht.

Was endlich die starke Intensitätsabnahme der Hauptentladung an Verzweigungsstellen der Bahn anbelangt, so sind dafür im wesentlichen folgende Gesichtspunkte maßgebend: Die Teilung des Stromflusses in einen Haupt- und Seitenkanal muß natürlich den ersteren schwächer werden lassen. Daß aber häufig der Seitenkanal heller leuchtet als der sich nach oben fortsetzende Hauptkanal, mag vielleicht in folgendem begründet sein: Man kann das System Blitzkanal—Boden als einen Kondensator auffassen; je stärker geneigt ein Kanalstück zum Boden ist, um so geringer ist seine Kapazität, um so geringer also auch sein Fassungsvermögen für elektrische Ladung. Umgekehrt ist also zu erwarten, daß ein dem Boden parallel orientierter

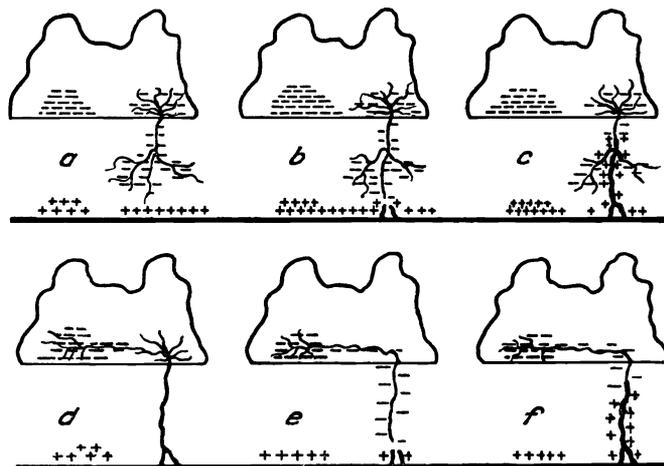


Abb. 39. Schema des Blitzmechanismus nach B. F. J. Schonland (a. a. O.).

¹⁾ B. Walter: *Ann. d. Phys.* **22**, 421—424, 1935.

²⁾ B. Walter: *Phys. Zeitschr.* **35**, 88—91, 1934.

Seitenzweig bei der Vorentladung mehr Elektrizität aufzunehmen vermag als der annähernd vertikale Hauptkanal. Die Folge ist, daß solche „stärker mit Ladung beschickte“ Kanalseitenzweige beim Rückschlag auch einen entsprechend höheren Prozentsatz des ladungsausgleichenden Stromes verbrauchen und so den Hauptkanal nicht nur auf die Hälfte, sondern viel stärker schwächen können. Eine andere von Malan und Collens (a. a. O.) diskutierte Erklärung, daß nämlich das Alter des Entladungsweges für den oberen Teil des Hauptkanals nach oben hin schneller zunimmt als für die Seitenzweige nach außen hin, und daß deshalb die verschiedenen Teile mit verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen werden, ist nach B. Walter nicht wahrscheinlich.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß durch die Schonlandschen Untersuchungen der Blitzmechanismus in seinen Hauptzügen als geklärt angesehen werden kann, wenn auch verschiedene Teilfragen noch

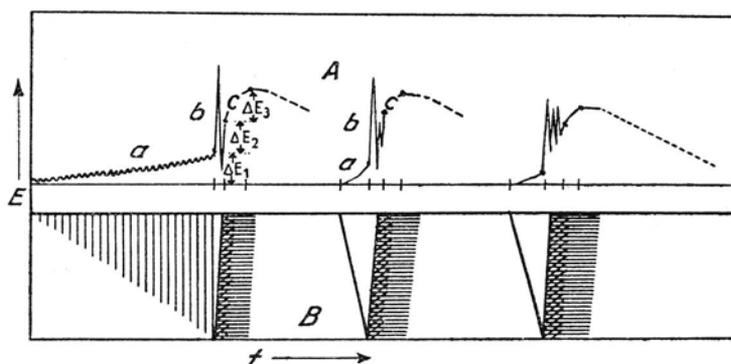


Abb. 40. Blitz- und Feldgeschehen nach Schonland, Hodgas und Collens. A: Feldänderung (oszillographisch, B: Blitzschema.

der Blitzbahn. Auf einen ersten Ansatz in dieser Richtung von B. F. J. Schonland, D. B. Hodges und H. Collens (a. a. O.) sei zum Schluß dieses Kapitels nur mit einer aus der zitierten Arbeit entnommenen Abb. 40 hingewiesen.

der Ergänzung bedürfen. Es versteht sich von selbst, daß das oben geschilderte Simpsonsche Blitzmodell nach diesen Erweiterungen als zu einfach und — vor allem bezüglich der postulierten Stromrichtung — zu einseitig erscheint. Die Toeplerschen Anschauungen dagegen sind recht gut mit den Schonlandschen Ergebnissen zu vereinigen.

Eine sinngemäße Weiterentwicklung dieser Dinge — in theoretischem wie praktischem Interesse — liegt in der Richtung, die Brücke zu finden zwischen dem differenzierten Blitzgeschehen und dem Verhalten des elektrischen Feldes in der näheren und fernerer Umgebung

IV. Kritische Prüfung der Gewittertheorien auf Grund von Beobachtungen am Boden.

Versuchen wir nun, die beiden geschilderten Gewittertheorien kritisch nebeneinander zu stellen und an Hand von Beobachtungsergebnissen am Boden auf ihren Wahrscheinlichkeitsgehalt zu prüfen.

1. Allgemeines.

Was die Voraussetzungen anbelangt, so ist beiden zunächst gemeinsam die Annahme, daß das Regenstadium eingeleitet sein muß, ehe die „ladungerzeugende Maschine“ zu wirken beginnt. Ihre Energiezufuhr entnimmt diese Maschine in einem Fall der kinetischen Energie der fallenden Tropfen (C. T. R. Wilson) — wobei der Wirkungsgrad prinzipiell abhängig ist von der Existenz eines elektrischen Feldes in der Wolke, und zwar eines positiven Feldes — im anderen der kinetischen Energie eines starken Aufwindes genügend turbulenten Charakters (C. G. Simpson). Beide Annahmen sind gleich wahrscheinlich; zugunsten der Simpsonschen Theorie könnte man allenfalls anführen, daß bei ihr die Voraussetzungen geringere sind, da sie über das ursprüngliche Feld keine Zusatzannahme zu machen braucht, um zur postulierten negativen Polarität zu kommen, während Wilson die angestrebte Feldrichtung gewissermaßen durch die — wenn auch sehr plausible — Annahme eines primär vorhandenen positiven Feldes in der Wolke vorschreibt. Da über das elektrische Feld in nicht bzw. noch nicht gewittrigen Wolken praktisch nichts bekannt ist, steht diese Wilsonsche Voraussetzung immerhin unbewiesen da. Andererseits ist die Simpsonsche Voraussetzung eines zum Lenard-Effekt an großen Tropfen ausreichenden Aufwindes von mindestens 8 m/sek mit entsprechender Bögigkeit durchaus möglich und auch beobachtet; ob ein solcher allerdings als regelmäßige Begleiterscheinung von Böen- und Gewitterwolken anzusehen ist, ist — auch nach Segelflugerfahrungen — fraglich.

Ein weiterer Punkt, der zugunsten der Simpsonschen Theorie als der in sich geschlosseneren und leichter zu überschauenden spricht, ist der, daß der Ablauf des Lenard-Mechanismus vom Beginn seines Einsetzens an qualitativ und bei plausiblen Zusatzmaßnahmen auch quantitativ zu übersehen ist, während bei Wilson zwischen dem Anlauf des Ladungsprozesses und seiner im endgültigen Gewitterfeld gipfelnden

Hauptperiode eine Lücke unbekannter Zeitdauer und unbekannter — stetiger oder stufenweiser? — Aufschaukelungsvorgänge liegt.

Andererseits ist ein von Anfang an gegen Simpson geltend gemachter Einwand (vgl. F. Schindelhauer a. a. O.) der, daß sein Ladungsmechanismus nur bei den genannten starken Aufwinden, also nur in Böen- und Gewitterwolken wirksam ist, während die Elektrisierung der Niederschläge bei ruhigem Regen und vor allem auch bei Schneefall nicht erklärt werden können; denn der Zerfall von Tropfen, die eine bestimmte Größe erreicht haben, allein — im Aufwind oder bei deren Fall —, d. h. das „Zerblasen“ im Lenardschen Sinne ist nicht elektrisch wirksam (P. Lenard a. a. O.). Wenn auch Simpson auf Schindelhauers und Lenards Einwände hin den Anspruch auf eine allgemeine Erklärung der Niederschlags elektrisierung, den er in seiner ersten Theorie (1909) erhoben hatte, fallen lassen mußte und bei der zweiten Fassung der Theorie (1927) die Elektrizitätsentwicklung dieser Art nur auf das Gewittergeschehen beschränkte, so bleibt es doch unbefriedigend, die Ladung gewittriger und nichtgewittriger Niederschläge auf verschiedene Ursachen zurückzuführen.

Ein weiterer ernster Einwand ist der, daß die Kondensationsprodukte in den Gewitterwolken keineswegs nur in flüssiger Form vorliegen, sondern daß gerade in den rasch aufschießenden Böen- und Gewitterwolken bevorzugt Graupel- und Hagelbildung einsetzt, an denen ein Lenard-Effekt nicht in Frage kommt. Ebenso können Wintergewitter nicht ohne weiteres nach diesem Schema erklärt werden. Wenn auch nach den Untersuchungen von A. Staeger, K. Kähler und C. Dorno¹⁾ an Schneeteilchen eine Art Lenard-Effekt gleicher Vorzeichenrichtung (kleine Teilchen negativ, große positiv) möglich ist, so ist an Graupel- und vor allem Hagelkörnern derartiges kaum denkbar²⁾.

Die eigentlichen Kriterien zur Prüfung der beiden Gewittermodelle ergeben sich aus der Untersuchung der Niederschlagsverhältnisse und der Änderungen des elektrischen Feldes am Boden beim Vorbeizug eines Gewitters, sowie bei Blitzen und — ergänzend hierzu — aus dem Verhalten des Vertikalstromes.

2. Die elektrische Ladung der Niederschläge.

Dieser Punkt wurde schon oben bei der Simpsonschen Theorie näher besprochen. Die Tatsache, daß die Unterschiede der gewittrigen und der nichtgewittrigen Niederschläge nur graduell sind und daß Regen und Schnee einen auffallenden Antiparallelismus des Vorzeichens aufweisen, machen es sehr wahrscheinlich, daß die Niederschlags elektrisierung in allen Fällen auf dem gleichen Mechanismus beruht. Zudem treten in unseren Breiten die positiven und negativen Niederschläge beim Gewitter meist nicht in der nach dem Simpsonschen Modell zu erwartenden Reihenfolge (s. o.) auf, sondern wechseln ihr Vorzeichen während eines Gewitters in ganz unregelmäßiger Reihenfolge. Ferner sind im Frühjahr und Sommer, also während der Hauptgewitterzeit, hier die negativen Niederschlagsladungen häufiger als im Herbst und Winter, während bei allein verantwortlichem Lenard-Effekt das Umgekehrte zu erwarten wäre. Der Einwand Gschwends gegen den nach Simpson zu erwartenden Zusammenhang zwischen Tropfengröße und Ladungsvorzeichen wurde ebenfalls oben schon erwähnt.

Endlich sei zu diesem Kriterium noch mal darauf hingewiesen, daß es überhaupt keine klare Entscheidung über die Polarität der Wolken zu geben vermag: Wie oben im Zusammenhang mit der Wilsonschen Gewittertheorie erwähnt, kann ein Niederschlag je nach der Feldrichtung beim Fall von der Wolke

¹⁾ A. Staeger: Ann. d. Phys. **76**, 49—70, 1925; **77**, 225—240, 1925; K. Kähler und C. Dorno: Ann. d. Phys. **77**, 71—80, 1925; K. Kähler: Met. Zeitschr. **39**, 293—298, 1922.

²⁾ Bei dieser Gegenüberstellung der beiden Gewitteranschauungen drängt sich unwillkürlich ein Gedanke auf, der vielleicht eine gewissermaßen psychologische Erklärung für ihre diametral entgegengesetzte Art zu geben vermag: Simpson fußt bei seinen Überlegungen auf Messungen und Gewitterbeobachtungen in den Tropen (Indien), wo die Niederschläge in der Mehrzahl gewittriger Art sind und außerdem Hagel, Graupel und Schnee nicht vorkommen; es liegt daher nahe, daß er bei seinem Gewittermechanismus den Verallgemeinerungsanspruch erhebt, daß dieser die Niederschlags elektrisierung allgemein erklärt. Elster und Geitel und Wilson dagegen entwickeln ihre Anschauungen auf Grund von Niederschlagsbeobachtungen in Deutschland bzw. England, wo nur etwa 10% aller Niederschläge gewittrigen Charakter haben, werden also bei ihren theoretischen Überlegungen a priori nach einem Mechanismus der Ladungsbildung in den Wolken suchen, der auch das Gewitter, vor allem aber die nichtgewittrigen Niederschlagsladungen erklären kann und der auch bei Niederschlägen in fester Form seine Wirksamkeit nicht einbüßt.

Möglicherweise sind auch die Mechanismen der Gewitterbildung in den Tropen und den gemäßigten Breiten wirklich verschiedener Art, so daß für die eine bevorzugt die Simpsonsche, für die andere bevorzugt die Wilsonsche Anschauung zutreffen könnte — eine Hypothese, die vielleicht durch eine statistische Untersuchung der Potentialgefälleänderungen bei Gewitter in unseren Breiten im Vergleich zu den diesbezüglichen Untersuchungen von Banerji (s. u.) an indischen Gewittern geprüft werden könnte. Daß eine solche Vermutung eines „lokalen Bedingtheits“ der einen oder anderen Gewitterpolarität nicht ganz abwegig ist, beweisen übrigens die Ergebnisse von D. Nukuyama und H. Noto (Jap. Journ. Astroph. and Geoph. **6**, 71—81, 1928), nach denen in Japan bei Gewittern an der Küste die Wilsonsche (positive), bei solchen im Inneren des Landes die Simpsonsche (negative) Polarität vorherrscht.

zur Erde seine Ladung verändern und sogar das Vorzeichen umkehren. Eindeutige Ergebnisse könnten nur durch direkte niederschlagselektrische Untersuchungen in den Wolken selbst gewonnen werden.

Selbstverständlich bleibt die Möglichkeit offen, daß beide Grundeffekte je nach den äußeren Umständen den Niederschlägen Ladungen erteilen können. Es wäre demnach durchaus möglich, daß etwa in den Tropen der Lenard-Effekt, bei uns der Elster-Geitel-Effekt der Hauptträger der Elektrizitätsbildung auf den Niederschlagsteilchen wäre.

3. Das elektrische Feld am Boden.

Das zu erwartende Verhalten des elektrischen Feldes am Boden beim Vorbeizug einer positiven oder negativen Dipol-Wolke wurde oben im Anschluß an die Wilsonsche Theorie bereits besprochen. Demnach ist also grundsätzlich zu erwarten, daß eine zentral über dem Beobachtungsort stehende positiv (negativ) polare Wolke einen negativen (positiven) Potentialgradienten am Boden erzeugt, während bei Annäherung bzw. bei Abzug der Wolke der Potentialgradient bei bestimmter, von der Lage und vertikalen Erstreckung des Dipols abhängiger Entfernung ein sekundäres Maximum umgekehrten Vorzeichens — also bei positiver (negativer) Polarität ein solches positiver (negativer) Richtung — durchläuft.

Direkte Untersuchungen des Feldverlaufes beim Vorbeizug von Gewitter- und Böenwolken sind nur selten statistisch bearbeitet worden, da das Hauptgewicht bei dieser Fragestellung stets auf die Feldänderungen im Zusammenhang mit Blitzentladungen gelegt wird (s. unten). Einen indirekten Schluß erlauben in dieser Richtung Messungen der Vertikalströme und der Gewitterwolken, auf die im übernächsten Abschnitt kurz eingegangen wird.

Vergleichbare Statistiken liegen vor von B. F. J. Schonland und J. Craib¹⁾ in Südafrika und von S. K. Banerji²⁾ in Indien. Schonland, der ebenfalls in erster Linie die Feldsprünge bei Blitzen untersucht, gibt für die 18 vermessenen Gewitter über das Integrafeld ("Steady field") folgende Zusammenstellung:

Sofern mit seiner Meßanlage (Wilson-Platte bzw. Wilson-Kugel) das Feld von Ferngewittern in 8—35 km Entfernung bestimmt werden konnte, war es ausnahmslos positiv; Nahgewitter in 1—5 km Entfernung waren ebenso ausnahmslos von hohen negativen Gradienten am Boden begleitet; d. h. also die von

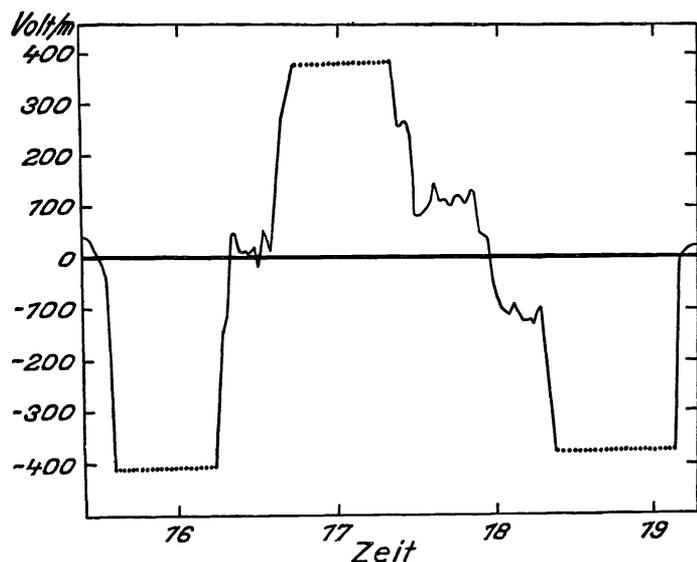


Abb. 41. Feldverlauf bei einem Wärmegewitter in Indien nach S. K. Banerji.

ihm bearbeiteten Gewitter zeigten sämtlich ein Bodenfeld, wie es beim Vorbeizug eines Dipols positiver Polarität, mit anderen Worten einer im Wilsonschen Sinne aufgebauten Gewitterwolke entspricht.

Zum gegenteiligen Ergebnis kommt S. K. Banerji: An 31 Wärme- und Frontgewittern in Indien (Colaba-Observatory, Bombay) findet er fast ausnahmslos eine Gesetzmäßigkeit des Feldverlaufes am Boden derart, daß bei Annäherung der Gewitterwolke sich im allgemeinen ein starkes negatives Feld ausbildet; wenn dann der vordere Wolkenrand den Zenit überschritten hat, schlägt das Feld ziemlich plötzlich nach der positiven Richtung um, um nach Vorbeizug des Gewitterzentrums — meist schwächer — nochmals nach der negativen Richtung umzuschlagen und dann allmählich wieder zur normalen Richtung und Stärke zurückzukehren. In Abb. 41 zeigt eine solche typische (Benndorf-) Registrierung. Banerji schließt aus diesem Verhalten des Feldes, daß die Vorder- und Rückseite eines Gewitters in der Hauptsache negative,

der zentrale Teil positive Raumladung enthält, und entwickelt daraus folgende — an die Simpsonsche Vorstellung anschließende, sie aber etwas modifizierende — Schemata eines Front- bzw. Wärmegewitters (Abb. 42 und 43).

Weiter schließt Banerji aus dem Feldverlauf beim Vorbeizug nichtgewittriger Monsunregenvolken, der während des Regens bevorzugt negativ ist und um so höhere Feldstärken aufweist, je lebhafter die Monsunströmung ist, daß die Lenard-Simpsonsche „Elektrifiziermaschine“ auch für diese Regen verantwortlich zu machen sei.

¹⁾ B. F. J. Schonland und J. Craib: Proc. Roy. Soc. (A) 114, 229—243, 1927.

²⁾ S. K. Banerji: Quart. Journ. Roy. Met. Soc. 56, 305—334, 1930; Phil. Trans. (A) 231, 1—27, 1933.

War der Feldverlauf nicht so einheitlich, wie im Beispiel der Abb. 41, so ließ er sich zwangslos deuten durch die Aufeinanderfolge zweier gleichartig aufgebauter und in sich zusammenhängender Gewitter. Banerji nimmt deshalb einfache ("unitary type") und doppelte ("double type") Gewitter an, d. h. also solche mit einem oder zwei Lenard-Simpson-Zentren.

Der Ausfall dieser Versuche ist zweifellos als starke Stütze für die Simpsonsche Gewittertheorie zu werten und beweist zum mindesten, daß diese bei tropischen Gewittern einen starken Anspruch auf Gültigkeit erheben kann.

Leider fehlen bisher ähnliche Untersuchungen an Gewittern in anderen Breiten fast völlig. Zudem sind nach K. Kähler¹⁾, der einige Versuche zur Vorzeichenbestimmung der Wolkenladungen durch Feldmessung an mehreren Stationen gleichzeitig beschreibt, nur schwer eindeutige Schlüsse möglich. Trotzdem würden meines Erachtens ausgedehnte statistische Untersuchungen des Benndorf-Verhaltens beim Vorbeizug von Gewittern in unseren Breiten zum mindesten wichtige Ergänzungen zu den diesbezüglichen Schonlandschen und Banerjischen Arbeiten liefern.

Es mag zum Schluß erwähnt werden, daß nach einer inzwischen von M. Krestan²⁾ durchgeführten statistischen Bearbeitung der Potsdamer Beobachtungen und Registrierungen (zugrunde gelegt sind 170 Gewitter aus den Jahren 1930—1935) hier der Simpson- und der Wilson-Typ des Gewitters gleich häufig zu sein scheint. Wegen verschiedener interessanter Einzelheiten muß auf das demnächst zur Veröffentlichung kommende Original verwiesen werden.

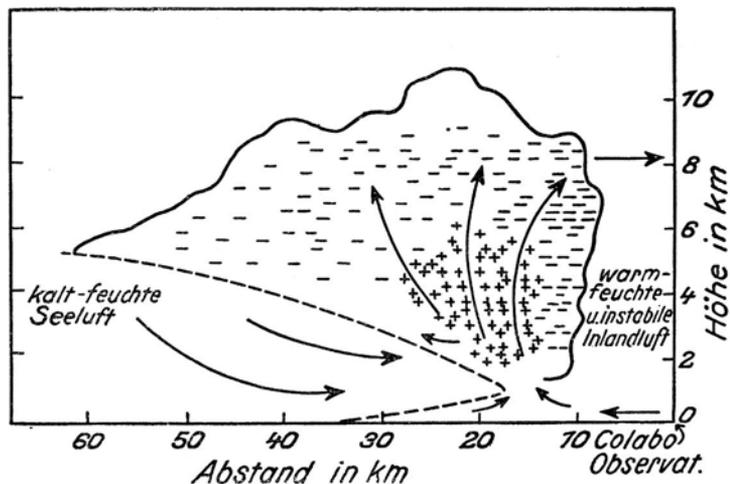


Abb. 42. Schematischer Aufbau eines Frontgewitters in Indien nach S. K. Banerji.

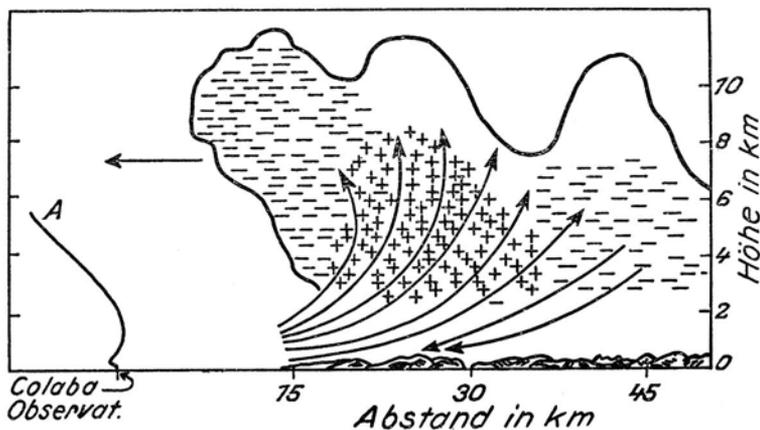


Abb. 43. Schematischer Aufbau eines Wärmegewitters in Indien nach S. F. Banerji.

4. Die Feldsprünge bei Blitzen.

Messungen dieser Art sind für das Verständnis des Gewittergeschehens am aufschlußreichsten und namentlich in neuerer Zeit mit verfeinerten Hilfsmitteln häufig zur Ausführung gekommen.

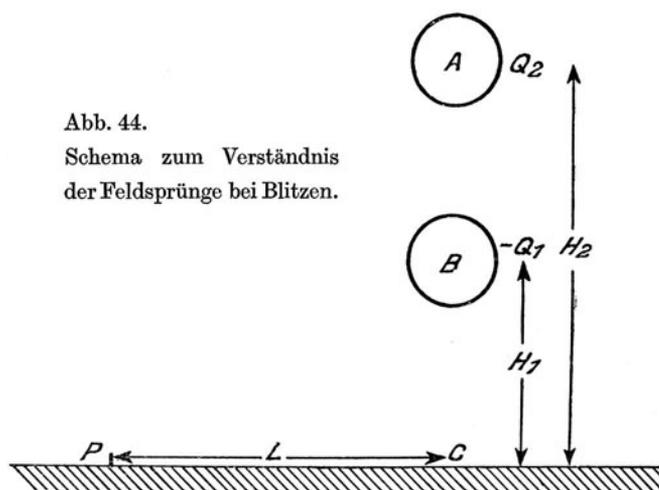
Die Grundlage aller Überlegungen ist die Voraussetzung einer bipolaren Wolke. Sind zwei — im allgemeinen Fall verschieden große — Ladungsmengen Q_2 und $-Q_1$ in zwei Raumgebieten A und B übereinander gelagert (Abb. 44), so ist das Feld F am Boden im Punkt P (Abstand L vom Fußpunkt C des Dipols) gegeben durch:

$$P = \frac{2 Q_2 H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}} - \frac{2 Q_1 H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}}$$

d. h. das Feld im Punkt C ist negativ (positiv) bei positiver (negativer) Polarität der Wolke. Feldumkehr findet statt in einer Entfernung L_0 , die gegeben ist durch die Beziehung

$$H_2 \cdot (H_1^2 + L_0^2)^{3/2} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot H_1 \cdot (H_2^2 + L_0^2)^{3/2}$$

Abb. 44. Schema zum Verständnis der Feldsprünge bei Blitzen.



¹⁾ K. Kähler: Abh. Pr. Met. Inst. Bd. IV, Nr. 1, 1911.

²⁾ M. Krestan; Gerl. Beit. 57, 334—356, 1941 (Benndorf-Heft).

Blitzentladungen sind nun denkbar zwischen dem Gebiet B bzw. A und Erde oder zwischen A und B. Die hierdurch bedingten Feldänderungen DF berechnen sich nach der ersten der obigen Gleichungen zu:

Entladung von A nach C:

$$DF = - \frac{2 Q_2 H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}}.$$

Entladung von B nach C:

$$DF = + \frac{2 Q_1 H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}}.$$

Entladung von A nach B oder umgekehrt:

$$DF = - 2 Q_2 \left(\frac{H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}} - \frac{H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}} \right), \text{ wenn } Q_1 > Q_2$$

oder $DF = - 2 Q_1 \left(\frac{H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}} - \frac{H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}} \right), \text{ wenn } Q_1 < Q_2 \text{ ist.}$

Die Q-Werte sind bei voller Entladung der Wolkengebiete identisch mit deren gesamtem Ladungsinhalt; bei nicht vollständiger Entladung bedeuten sie die im Blitz ausgeglichenen Ladungsmengen.

Nach den beiden letzten Gleichungen kehrt sich also bei Wolkenblitzen ebenfalls in bestimmter Entfernung vom Fußpunkt C die Richtung des Feldsprunges ebenso wie die des Feldes überhaupt um. Die Entfernung, in der dies erfolgt, liegt bei L'_0 , wo L'_0 gegeben ist durch die Beziehung

$$H_2 \cdot (H_1^2 + L'^2_0)^{3/2} = H_1 \cdot (H_2^2 + L'^2_0)^{3/2}.$$

L_0 nach der zweiten Gleichung und L'_0 nach dieser letzten Gleichung stimmen also nur bei gleichem Absolutbetrag von Q_1 und Q_2 überein.

Nach den obigen Gleichungen ergibt sich jetzt folgendes Schema der Feldsprungrichtung je nach Polarität und Entfernung des Gewitters (unter Ferngewitter ist hier ein solches verstanden, dessen Fußpunkt weiter als L'_0 vom Beobachtungsort entfernt ist):

| Entladungstyp | Positive Polarität der Gewitterwolke Feldsprung | Negative Polarität der Gewitterwolke Feldsprung |
|---------------|---|---|
| Ferngewitter | | |
| AB | negativ | positiv |
| BC | positiv | negativ |
| AC | negativ | positiv |
| Nahgewitter | | |
| AB | positiv | negativ |
| BC | positiv | negativ |
| AC | negativ | positiv |

B. F. J. Schonland und J. Craib (a. a. O.) untersuchen nun an 18 Gewittern in Südafrika, wo ebenso wie in den Tropen (G. C. Simpson, a. a. O.) die Häufigkeit der Wolkenblitze wesentlich größer als die der Erdblitzes, wo also ein besonders eindeutiges Ergebnis zu erwarten ist, die Feldsprünge und kommen zu folgendem statistischen Ergebnis:

Ferngewitter zeigen bei 798 blitzbedingten Feldsprüngen 666 negative und 132 positive Fälle, Nahgewitter in 48 Beobachtungen 39 positive und 9 negative Sprünge. Nach der Tabelle ist also, da die AB-Entladungen überwiegen, das eindeutige Vorherrschende positiver Polarität bei diesen Gewittern zu entnehmen¹⁾.

Zu den gleichen Ergebnissen kommt in Südafrika auch E. C. Halliday²⁾, der ebenfalls gleichzeitig die Blitzart zu jedem Feldsprung feststellt. Danach sind bei den in Johannesburg beobachteten Gewittern

¹⁾ Eine ergänzende Weiterführung dieser Untersuchungen, bei der die Entladungsart der Blitze (Wolken- oder Erdblitz), sowie ihre Entfernung genauer berücksichtigt sind (B. F. J. Schonland: Proc. Roy. Soc. 118, 233—251, 1928), erbringt eine volle Bestätigung. Bei 29 mehr als 15 km entfernten Gewittern werden 1931 negative und 188 positive, bei 6 7—15 km entfernten 83 negative und 81 positive, bei 6 Nahgewittern 9 negative und 188 positive Feldsprünge beobachtet. Trotzdem G. C. Simpson (Proc. Roy. Soc. 114, 376—401, 1927) versucht, die erstgenannten Schonlandschen Ergebnisse im Sinne seiner Theorie zu deuten, sieht dieser wohl mit Recht in seinen Ergebnissen einen starken Gegenbeweis gegen Simpson.

²⁾ E. C. Halliday: Proc. Roy. Soc. (A) 138, 205—229, 1932.

bei Fern- (Nah-) Gewittern Wolkenblitze in 137 Fällen von negativen, in 9 Fällen von positiven (in 18 Fällen von negativen und 86 Fällen von positiven) Feldänderungen begleitet. Bei Erdblitzten ist das Verhältnis positiv : negativ = 267 : 16. Auch diese Ergebnisse sind als ein einwandfreier Beweis für positive Wolkenpolarität anzusehen.

Nicht ganz so eindeutig zu erklären sind die Ergebnisse von C. T. R. Wilson¹⁾ an Gewittern in England, bei denen 528 positiven 336 negative Feldsprünge gegenüberstehen. Die Einzelbeschreibung der Gewitter zeigt, daß ein großer Teil — wahrscheinlich die Mehrzahl — der Entladungen zwischen Wolkenbasis und Erde übergegangen sind (BC-Blitze); diese Blitze haben nun, wie die obige Tabelle zeigt, unabhängig von der Entfernung einen Feldsprung mit zur Polarität der Wolke gleichsinniger Richtung zur Folge. Wilson zieht deshalb aus seinen Zahlen 528 zu 336 auch den Schluß überwiegend positiver Wolkenpolarität.

E. V. Appleton, R. A. Watson Watt und J. F. Herd²⁾ weisen darauf hin, daß nach den erwähnten Wilsonschen Messungen sich für Gewitter in weniger als 5 km Entfernung ein Verhältnis positiver zu negativen Feldsprüngen von 4 : 1, für solche von 5—30 km Entfernung ein Verhältnis von 1,5 : 1 ergibt — eine Feststellung, die ebenfalls auf positive Wolkenpolarität hinweist, da bei solcher in geringer Entfernung auch die AB-Blitze positive Feldsprünge bedingen, die in größerer Entfernung das Umgekehrte zur Folge haben (vgl. Tabelle). Appleton und Mitarbeiter untersuchen nun mittels Kathodenstrahloszillographen die durch plötzliche Feldänderungen in einer Antenne bedingten Ladungsverschiebungen — benutzen also gewissermaßen eine außerordentlich verfeinerte Wilson-Apparatur — und können auf diese Weise noch blitzbedingte Feldsprünge bei 500 und mehr Kilometer Gewitterentfernung feststellen. Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenstellung ihrer Ergebnisse:

Tabelle.

| Station | negative Feldsprünge | positive | negativ/positiv |
|--|-------------------------|----------|-----------------|
| Aldershot (Entfernung bis 20 km) . . . | 536 | 395 | 1,36 |
| Aldershot (Entfernung etwa 150 km) . . | 468 | 81 | 5,8 |
| Cambridge (Entfernung bis 20 km) . . . | 304 | 199 | 1,53 |
| Heluan (Entfernung bis 500 km) | 171 | 1 | 171 |
| Khartum (Entfernung etwa 250 km) . . . | 598 | 46 | 13 |

Demnach überwiegen also bei Ferngewittern die negativen Feldsprünge durchweg. Besonders auffallend ist das extreme Überwiegen in Heluan. Man ist unwillkürlich zu der Vermutung gedrängt, daß hier (in Ägypten), wo die Häufigkeit von Erdblitzten ebenso wie in Südafrika und in den Tropen schon wesentlich gegenüber der der Wolkenblitze zurücktreten dürfte, die auch von Schonland gefundene Beziehung der überwiegend negativen Feldsprünge reiner hervortritt als bei den Messungen in England, die nicht eindeutig zugunsten des Wilsonschen Gewittermodelles sprechen. Lediglich als Vermutung mag ferner ausgesprochen werden, daß das geringe Überwiegen der negativen Feldsprünge in dem rund 1600 km südlicher und damit näher an den Tropen gelegene Khartum möglicherweise einen Hinweis in der schon oben geäußerten Richtung geben, daß die Tropengewitter mehr der Simpsonschen Vorstellung entsprechen. Analoguntersuchungen aus den Tropen selbst sind bisher nicht bekannt.

Einen besonderen Fortschritt der Blitzstromrichtungsuntersuchung bedeuten die Arbeiten von A. Matthias³⁾, bei denen mittels Schleifenoszillographen gleichzeitig alle Blitzwirkungen aufgezeichnet werden: Feld, Feldänderung, Blitzstrom- (Vertikalstrom-)Änderungen und Dauer (Entfernung). Die positiven Feldänderungen überwogen die negativen etwa im Verhältnis 2 : 1. Mit Hilfe der Blitzstromregistrierung in den Rahmenantennen ließ sich bei 84 nahen Blitzschlägen die Strömungsrichtung bestimmen. Nicht weniger als 72 hatten die Richtung Erde—Wolke, waren also negativ, und nur 12 die positive Richtung Wolke—Erde. Das Verhältnis der negativen zu den positiven Blitzen war demnach 6 : 1 und nicht 2 : 1, wie man aus den Feldänderungen hätte schließen können. Die negativen Blitze waren also noch weit häufiger, als Wilson, der schon aus seinen nicht eindeutigen Feldänderungsmessungen auf das Überwiegen der negativen Blitze geschlossen hatte, annahm.

Abschließend ist also zu sagen, daß die Feldsprungbestimmungen nebst ihren Ergänzungen durch die Matthiasschen „Universalmessungen“ im wesentlichen zugunsten der Wilsonschen Theorie entscheiden.

¹⁾ C. T. R. Wilson: Proc. Roy. Soc. (A) **92**, 555—574, 1916; Phil. Trans. (A) **221**, 73—115, 1921.

²⁾ E. V. Appleton, R. A. Watson Watt und J. F. Herd: Proc. Roy. Soc. (A) **111**, 654—677, 1926.

³⁾ A. Matthias: Elektrizitätswirtschaft **25**, 297, 1926; **26**, 2—18, 1927; s. a. H. Schwenkhagen: Schriften der naturf. Ges. Danzig **20**, 95—120, 1937.

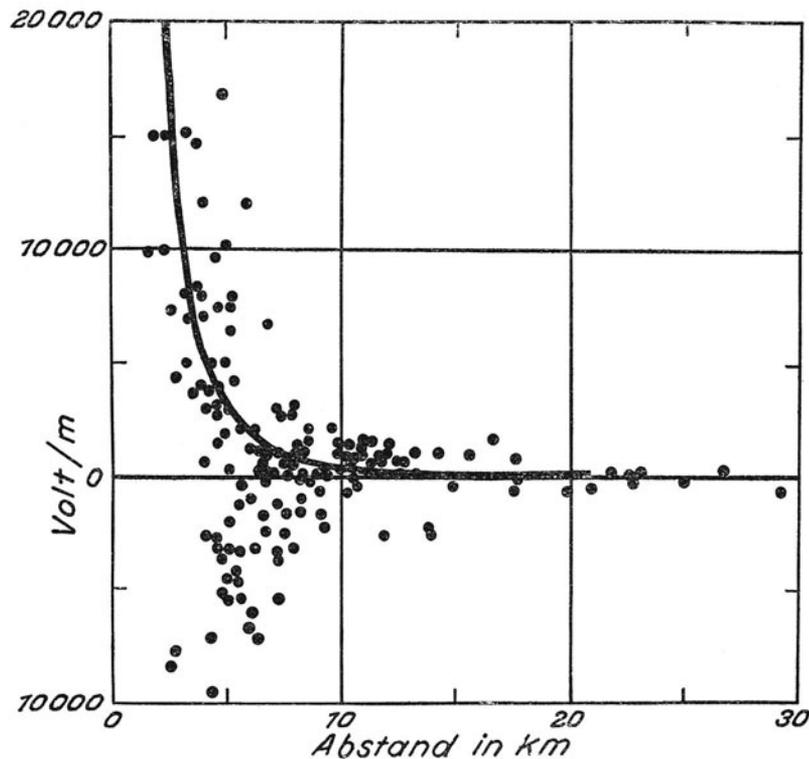


Abb. 45. Größe des Feldsprungs und Blitzentfernung nach C. T. R. Wilson.

Ehe zum folgenden Punkt übergegangen wird, sind in diesem Zusammenhang einige Bemerkungen am Platze über die Anwendung von Feldsprungmessungen zur örtlichen Gewitterprognose, wie sie heute zu verschiedenen praktischen Zwecken versucht wird. C. T. R. Wilson¹⁾ gibt in einer in der folgenden Abb. 45 wiedergegebenen Zusammenstellung von Feldsprüngen die Abhängigkeit von der Blitzentfernung, aus der die Möglichkeit eines Rückschlusses aus Feldsprungmessungen auf herannahendes Gewitter ohne weiteren Kommentar hervorgeht. Eigene noch unveröffentlichte Untersuchungen des Verfassers mit einem Feldvariographen²⁾, der im wesentlichen aus einer dauernd exponierten Wilson-Platte besteht, ergeben, daß mit wesentlicher Sicherheit ein herannahendes Gewitter im Mittel 30—40 Min. vor dem ersten hörbaren Donner oder ein in 30 km Entfernung vorbeiziehendes Gewitter in der Registrierung erkannt werden kann. Es bedarf zur Erweiterung dieses örtlichen oder zeitlichen Warnbereiches lediglich einer Begrenzung der Feldunruhe-Aufzeichnung auf kürzeste Schwankungsperioden und eine Erhöhung der Empfindlichkeit, um mit genügender

Sicherheit etwa die Annäherung einer Gewitterfront auf 100 km Entfernung und mehr sicher erkennen zu können. Der Übergang zu den Untersuchungen der atmosphärisch-elektrischen Parasiten in Zusammenhang mit dem Gewitter liegt auf der Hand.

5. Der Vertikalstrom bei Gewitter.

Es ist eine notwendige Konsequenz der beiden zur Debatte stehenden Gewittertheorien, daß in den starken elektrischen Feldern zwischen Wolke und Erde auch der elektrische Vertikalstrom ganz erhebliche Werte annehmen muß und daß er an exponierten Spitzen (Baumgipfeln, Blitzableitern usw.) durch Spitzenentladung noch eine zusätzliche Verstärkung erfahren kann. Es ist deshalb zu erwarten, daß der Stromdurchgang durch eine in genügender Höhe aufgestellte Spitze, der relativ einfach zu messen ist, einen wichtigen Beitrag sowohl zur Kenntnis der Elektrizitätsbilanz der Erde wie auch zur Entscheidung über die Wolkenpolarität zu liefern vermag. Dem ist in der Tat so, wie die ausgedehnten Messungen dieser Art von T. W. Wormell³⁾ beweisen. Dieser registrierte mehrere Jahre lang in Cambridge den Stromdurchgang durch eine in 8,3 m Höhe aufgestellte Spitze und fand, daß bei Vorbeiziehen eines Gewitters im allgemeinen beim Herannahen der Spitzenstrom positiv war (Einströmen positiver Ladung in die Erde), dann beim Vorüberzug über die Station starke negative Werte annahm und zum Schluß beim Abzug des Gewitters wieder zu positiven Werten überging. Die Feldrichtung wechselte dementsprechend von positiv zu negativ und wieder zu positiv. Der einzig mögliche Schluß auf die Konzentration starker negativer Ladungen im unteren Teil der Wolke bedeutet also eine erneute Stütze des Wilsonschen Gewittermodells. Zu ganz ähnlichen Ergebnissen kommt auch B. F. J. Schonland⁴⁾ bei gleichartigen Messungen in Südafrika. Es wäre sehr zu begrüßen, wenn solche Untersuchungen auch in anderen Teilen der Welt, insbesondere auch in den Tropen zur Durchführung käme.

Eine Gesamtbilanz der Wormellschen Registrierungen ergibt ein klares Überwiegen des negativen Elektrizitätszuflusses zur Erde in Böen- und Gewitterfeldern, die zusammen mit anderen Ergebnissen F. J. Whipple⁵⁾ Veranlassung gibt, die Gesamtelektrizitätsbilanz der Erde auf Grund des im Wilsonschen

¹⁾ C. T. R. Wilson: Phil. Trans. Roy. Soc. (A) **221**, 73—115, 1921

²⁾ H. Israël: Wiss. Abh. des Reichsamts für Wetterdienst Bd. V, Nr. 12, 1939; Gerl. Beitr. **55**, 314—333, 1939; **56**, 228, 1939.

³⁾ T. W. Wormell: Proc. Roy. Soc. (A) **115**, 443—455, 1927; **117**, 587, 1929.

⁴⁾ B. F. J. Schonland: Proc. Roy. Soc. (A) **118**, 252—262, 1928.

⁵⁾ F. J. Whipple: Quart. Journ. Roy. Met. Soc. **64**, 199, 1938.

Gewittermodell zu sehenden Mechanismus zur Aufrechterhaltung der Erdladung zu ziehen und sie bei der Unsicherheit mancher Beobachtungseinzelheiten als annähernd befriedigend ausgeglichen anzusehen.

Überblickt man die in diesem Kapitel aufgeführten Erfahrungstatsachen, so ist nach der Mehrheit von ihnen die Wilsonsche Gewitteranschauung als die wahrscheinlichere anzusehen. Die Möglichkeit einer elektromotorischen Entstehungsverschiedenheit tropischer und nontropischer Gewitter, die sich mehrfach dabei aufdrängte, kann mangels genügend umfassenden Beobachtungsmaterials jeder Art an beiden Gewitterarten noch nicht als befriedigend geklärt angesehen werden und mag als vorläufige Arbeitshypothese bestehen bleiben.

V. Der elektrische Aufbau von Gewitterwolken nach direkten Messungen in der freien Atmosphäre.

Wie schon eingangs erwähnt und im letzten Abschnitt an Einzelheiten bewiesen, ist eine endgültige Entscheidung zugunsten der einen oder anderen Gewittertheorie bzw. — falls wider Erwarten beide Modelle versagen sollten — die Erkenntnis des wirklichen Mechanismus nur vom messenden bzw. registrierenden Vorstoß in die freie Gewitteratmosphäre selbst zu erwarten. Als erste und bisher einzige Arbeit dieser Art ist hier die Aufstiegsserie von G. C. Simpson und F. J. Scrase¹⁾ zu erwähnen, bei der im wesentlichen die Feldrichtung innerhalb der Gewitterwolken untersucht wird.

Das Registrierverfahren ist folgendes: Es wird ein etwa 20 m langer vertikaler Leiter ins Feld eingebracht und die Richtung des in ihm fließenden Stromes untersucht. Zu diesem Zweck hat der Leiter die in Abb. 46 wiedergegebene Form: Die Verbindung der beiden (nach oben und unten ragenden) Drahtstücke geht durch 2 Eisenstifte B und C in 3 mm Abstand über ein Blatt Polreagenzpapier, das auf einer uhrwerkgetriebenen Scheibe an ihnen vorbei bewegt wird. Als Reagenz ist folgende Lösung benutzt:

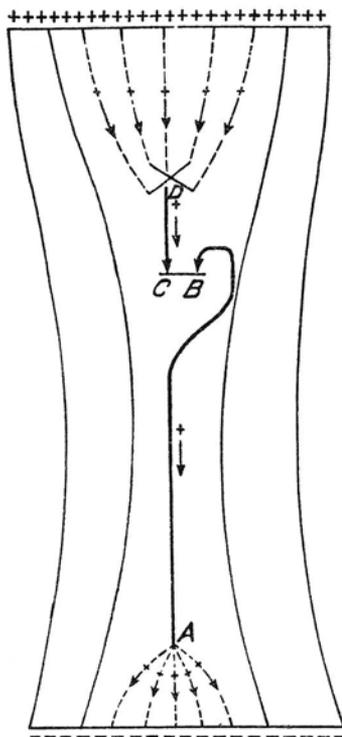


Abb. 46. Empfänger des „Alti-Elektrographen“ nach G. C. Simpson und F. J. Scrase.

| | |
|--|-------|
| Kalium-Ferrocyanid (gelbes Blutlaugensalz) . . . | 5 g |
| Ammoniumnitrat | 100 g |
| Glyzerin | 60 g |
| Wasser | 300 g |

die bei Stromdurchgang an der Anode Berliner Blau bildet; das Reagenz ist außerordentlich empfindlich und spricht bereits bei einem Stromdurchgang von 10^{-7} Amp. an.

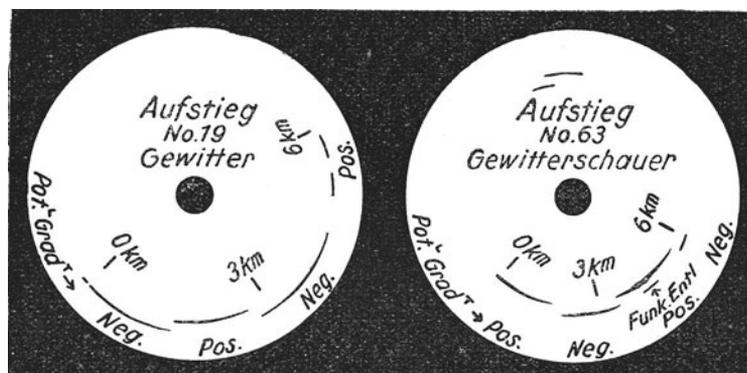


Abb. 47. Registrierbeispiele von Gewitteraufstiegen nach G. C. Simpson und F. J. Scrase.

Empfängersystem und Registriereinrichtung (die außerdem noch ein Aneroid zur Höhenbestimmung und zum Ausklinken des Trageballons in bestimmter Höhe, sowie ein Haarhygrometer zur Bestimmung der Wolkengrenzen enthält) sind in einem leichten Bambusrahmen eingebaut und werden von einem Ballon von 1,5 m Durchmesser mit etwa 5 m/sec in die Höhe getragen. Das Gesamtgewicht des Gespannes beträgt 795 g (bei späteren Aufstiegen noch etwa 100 g weniger).

¹⁾ G. C. Simpson und F. J. Scrase: Proc. Roy. Soc. 161, 309—352, 1937.

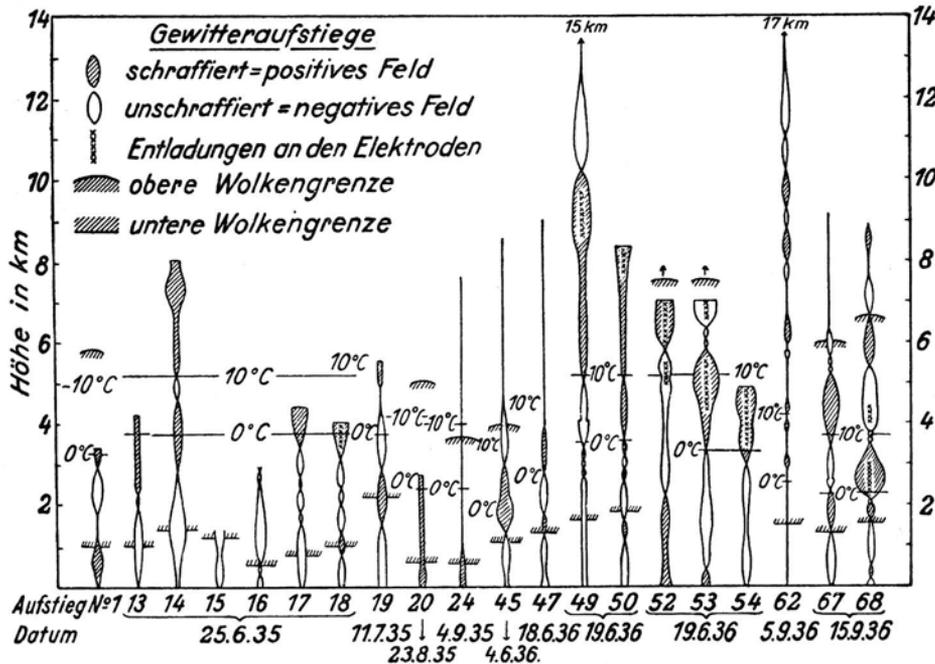


Abb. 48. Zusammenstellung der 20 Gewitteraufstiege von G. C. Simpson und F. J. Scrase.

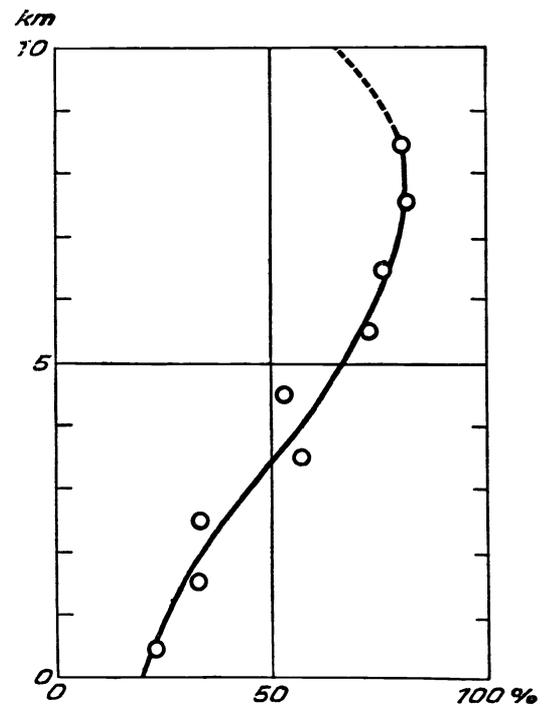


Abb. 49. Häufigkeit positiven Feldes in verschiedenen Höhen über dem Boden in Gewitterwolken nach den Aufstiegen von G. C. Simpson und F. J. Scrase.

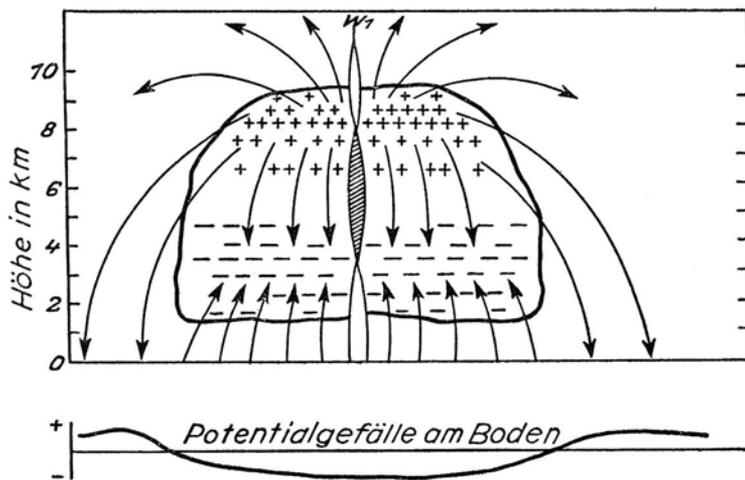


Abb. 50. Schema eines Wilson-Gewitters nebst zu erwartendem Registrierungsverlauf.

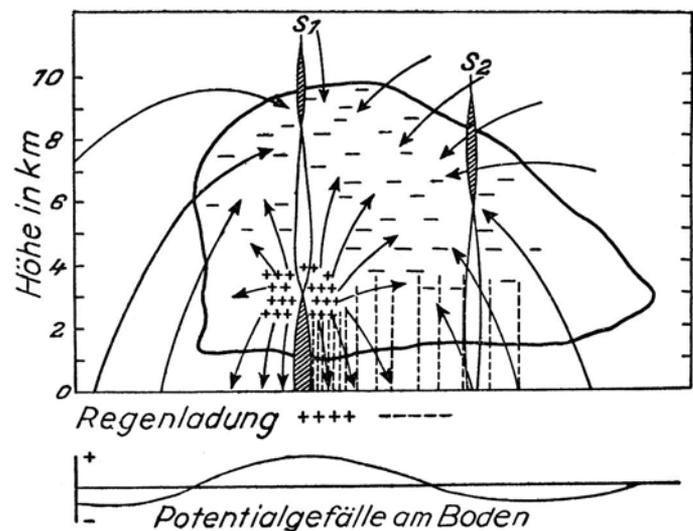


Abb. 51. Schema eines Simpson-Gewitters nebst zu erwartendem Registrierungsverlauf.

In Abb. 47 sind zwei Registrierbeispiele wiedergegeben. Man erkennt deutlich das abwechselnde Schreiben der einen oder anderen Feder, d. h. also die mehrmalige Feldumkehr während eines Aufstieges.

In der rechten Teilfigur von Abb. 47 haben an einer mit „Funk-Entl.“ bezeichneten Stelle bei besonderer Verdickung der einen Spur beide Federn geschrieben — die untere als Brennspur — was auf Sprüh- oder Funkenentladung am Drahtsystem hinweist.

Man kann, wie es Simpson und Scrase auch tun, die Dicke der Blauspur als qualitatives Maß für die Feldstärke heranziehen, wenn man eine laboratoriumsmäßige Strom-Spurdicke-Eichung (bei gegebener Papiergeschwindigkeit) mit der von F. J. W. Whipple und F. J. Scrase¹⁾ bestimmten Vertikalstrom-Feld-Beziehung koppelt.

In Abb. 48 sind nun sämtliche von Simpson und Scrase nach diesem Verfahren gewonnenen Gewitteraufstiege graphisch dargestellt. Die hellen Teile bedeuten negative, die schraffierten positive Gradienten. Die Abstände der beiden Linien geben jeweils die Feldstärke, kleine Kreuzchen zwischen

¹⁾ F. J. W. Whipple and F. J. Scrase: Geoph. Mem. Nr. 68, London 1936.

ihnen Sprüh- bzw. Funkenentladungen an den Drahtenden an. Soweit ermittelt, sind die unteren und oberen Wolkengrenzen eingezeichnet. Die Temperatur-Höhenangaben sind berechnet und mit Aufstiegsangaben von Duxford verglichen.

Auffallend ist zunächst die Tatsache, daß in 15 der 20 Fälle die Potentialgradienten unterhalb der Wolke negativ sind. Über die Häufigkeiten positiven bzw. negativen Feldvorzeichens in verschiedenen Höhen gibt Abb. 49 ein Bild. Demnach ist bis zu 3 km Höhe in Gewitterwolken das negative, von da an bis über 10 km Höhe das positive Vorzeichen bevorzugt. Nimmt man dies als repräsentativ — was angesichts der wenigen Einzelregistrierungen natürlich noch problematisch ist — so ist dieser Befund ohne Frage zugunsten des Wilsonschen Gewittermodelles zu deuten.

Da die bisher gewonnenen Aufstiege nur als ein Anfang anzusehen sind und für eine größere Statistik noch nicht hinreichen, kann man einstweilen nur den Versuch machen, aus der Betrachtung von Einzelfällen Aussagen über den effektiven Befund in einzelnen Gewitterfällen zu machen.

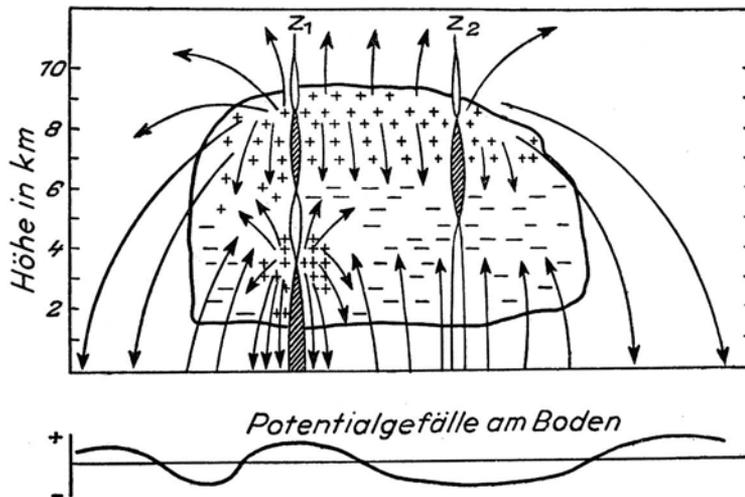


Abb. 52. Schema eines „kombinierten Wilson-Simpson-Gewitters“ nebst zu erwartendem Registrierungsverlauf.

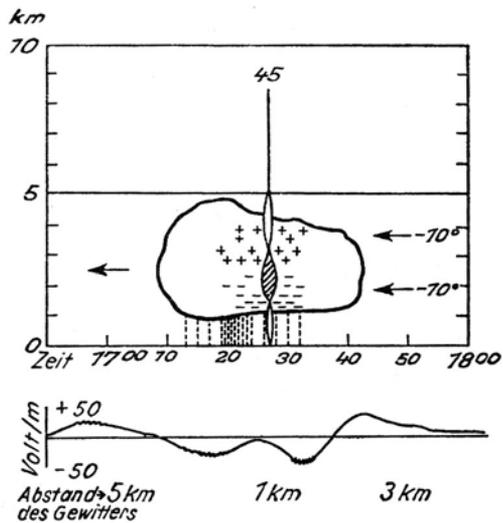


Abb. 53.

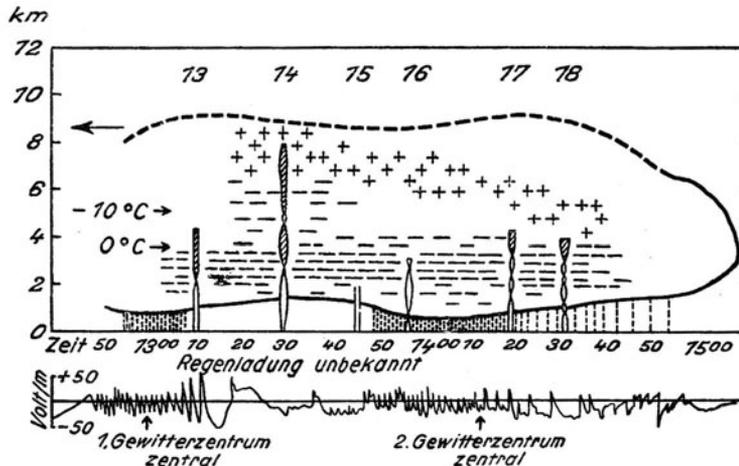


Abb. 54.

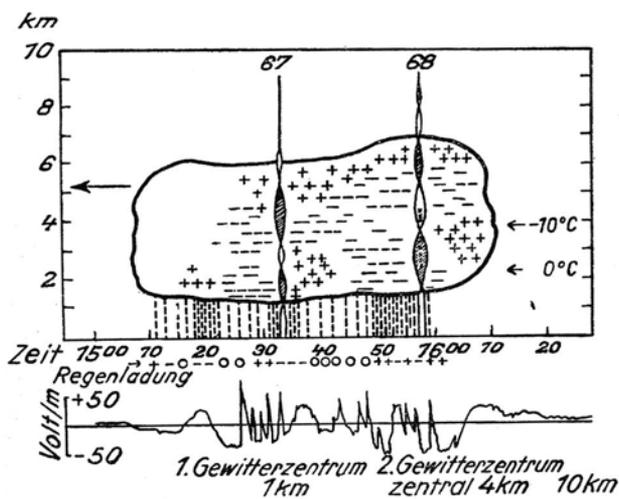


Abb. 55.

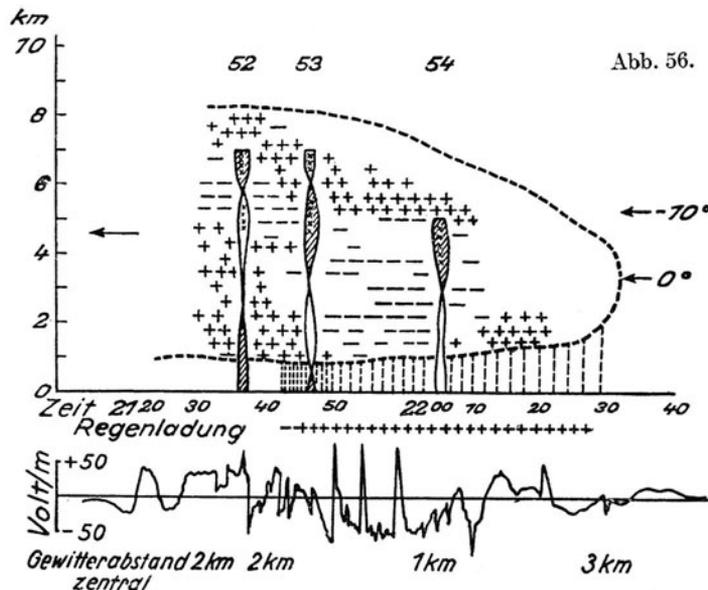


Abb. 56.

Abb. 53–56. Ladungsverteilungen in [Einzelgewittern, abgeleitet aus Alti-Elektrographen-Aufstiegen von G. C. Simpson und F. J. Scrase.

Überlegt man sich im Anschluß an die obigen Kapitel II und III, was für ein Registrierungsaussehen bei Gewittern nach dem Wilsonschen bzw. Simpsonschen Modell zu erwarten wäre, so ergeben sich die beiden in Abb. 50 und 51 dargestellten Schemata, die ohne weitere Erklärung verständlich sind.

Ein Blick auf Abb. 48 zeigt nun sofort, daß das Aussehen der Registrierungen im allgemeinen nicht für die Einordnung in das eine oder andere Schema spricht, daß diese vielmehr auf einen in Wirklichkeit komplizierteren Feldaufbau hindeuten.

Zur Annäherung an die Wirklichkeit stellen deshalb Simpson und Scrase einen dritten Gewittertyp zur Diskussion, der die Beteiligung beider Haupteffekte zur Voraussetzung hat und gewissermaßen durch Einbau eines Lenard-Zentrums in ein Wilson-Gewitter zustande kommt. Sein Aufbau und der zu erwartende Registrierungsverlauf sind in Abb. 52 dargestellt.

Versucht man nun die Einordnung der gefundenen Feldverteilungen, so ist dies unter Hinzunahme des kombinierten Modelles jetzt in allen Fällen möglich, wie die folgenden Abb. 53—56 zeigen. In diesen Abbildungen ist jetzt nach dem Aufbau des Feldes die wahrscheinliche Ladungsverteilung in der Wolke gezeichnet.

Abb. 53 und 54 sind demnach als „reine Wilson-“, 55 und 56 als „kombinierte Gewitter“ anzusprechen. Ein „reines Simpson-Gewitter“ ergibt sich bisher in keinem Fall.

Diesem Befund Rechnung tragend, geben Simpson und Scrase den Anspruch auf die Existenz von Gewittern nach Simpsons Vorstellung allein auf und stellen — vorbehaltlich weiterer Untersuchungen — den von ihnen versuchsweise eingeführten kombinierten Typ des Gewitters als den der Wirklichkeit am nächsten kommenden hin.

Ganz besonderes Interesse dürfte in Zukunft die Tatsache verdienen, daß die Trennungsschicht zwischen dem oberen stets positiven und dem unteren größtenteils negativen Gewitterteil fast regelmäßig im Gebiet zwischen der 0° -Isotherme und der -10° -Isotherme zu finden ist, eine Tatsache, für die vorläufig noch keine Erklärung möglich scheint, die aber dazu angetan ist, dem Gefrieren der Wolkenelemente eine noch zu klärende Bedeutung im Gewittermechanismus zuzuschreiben.

Abschließend zum Ganzen ist also zu bemerken, daß bereits die ersten orientierenden Untersuchungen in der freien Gewitteratmosphäre eine gewisse Entscheidung über den Wahrscheinlichkeitsgehalt der beiden Gewittertheorien von (J. Elster und H. Geitel), C. T. R. Wilson und (P. Lenard) G. C. Simpson haben erbringen können.

Nach einem Referat in den Physikal. Berichten (22, 2259, 1941) sind diese Aufstiege inzwischen fortgeführt worden. Ein näheres Eingehen darauf ist jedoch aus Raumgründen nicht mehr möglich.

Im allgemeinen entspricht die vorliegende, Anfang 1940 abgeschlossene Studie dem damaligen Stand der Kenntnisse. Von einer Erweiterung und Ergänzung mußte aus äußeren Gründen vorläufig Abstand genommen werden.

Es kann zum Schluß nur der Hoffnung Ausdruck gegeben werden, daß der neu beschrittene Weg aerologisch-luftelektrischer Untersuchungen den Anfang bedeuten möge für verbesserte und ausgedehntere Aufstiegsarbeiten — zum Nutzen der wissenschaftlichen Erkenntnis und der an ihr in steigendem Maße interessierten Praxis.

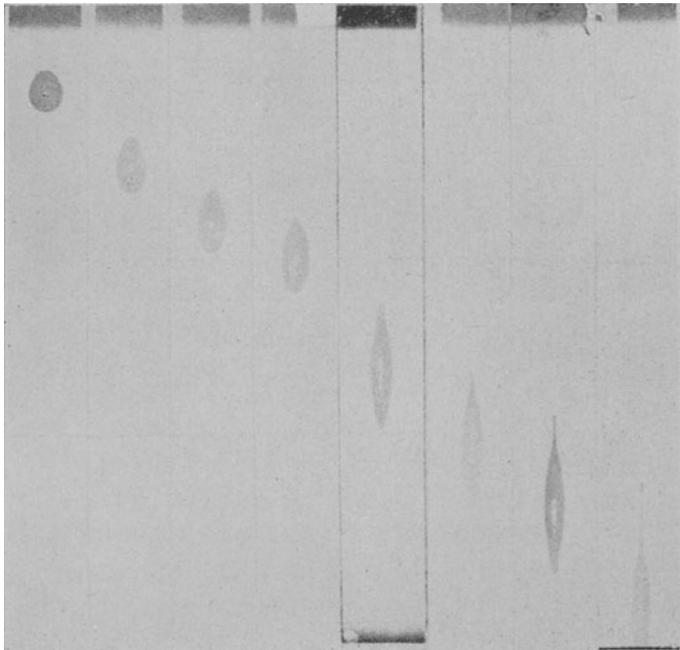


Abb. 3. Tropfendeformation in einem Feld von 8250 V/cm nach W. A. Macky.

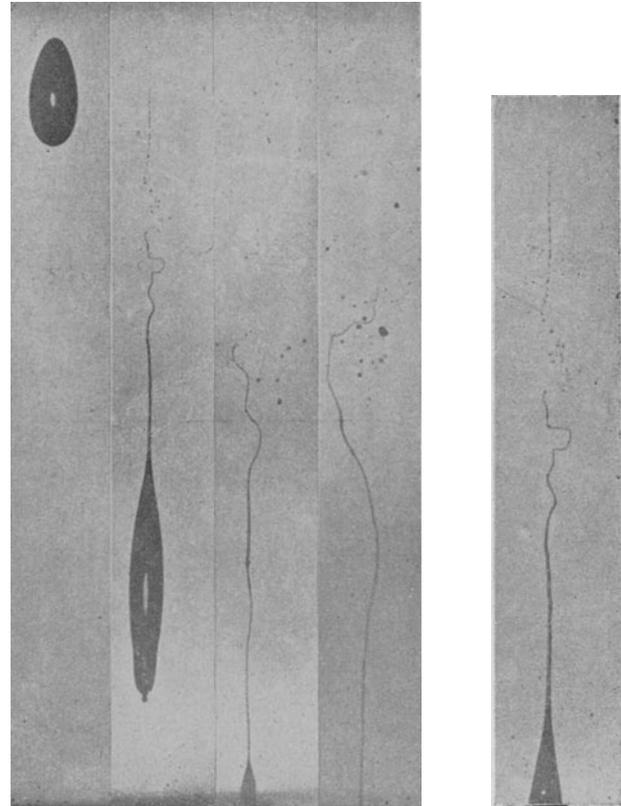


Abb. 4. Tropfendeformation in einem Feld von 8300 V/cm nach W. A. Macky.

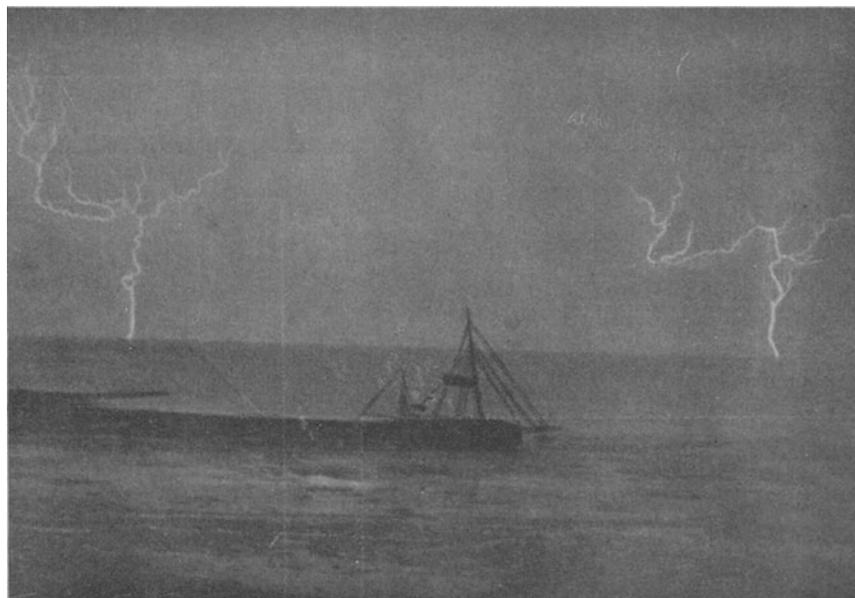


Abb. 12. Nach oben verzweigter Blitz nach G. C. Simpson.

Tafel 2.

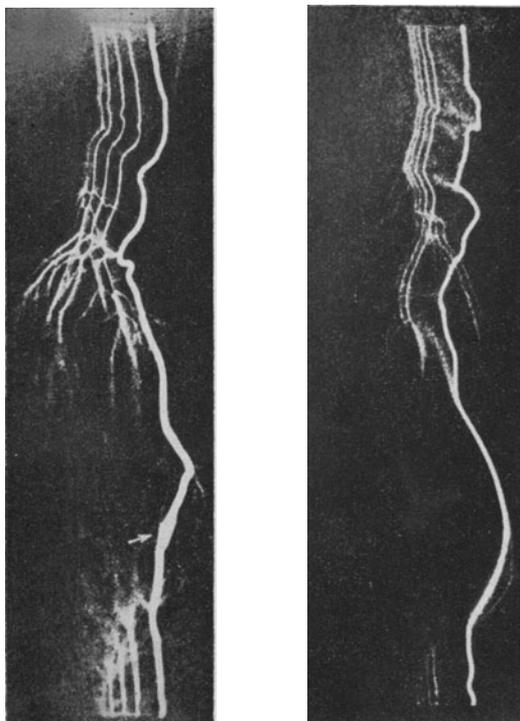


Abb. 13. Funkenentladungen zwischen Platindrähten in 8 cm Abstand nach B. Walter.

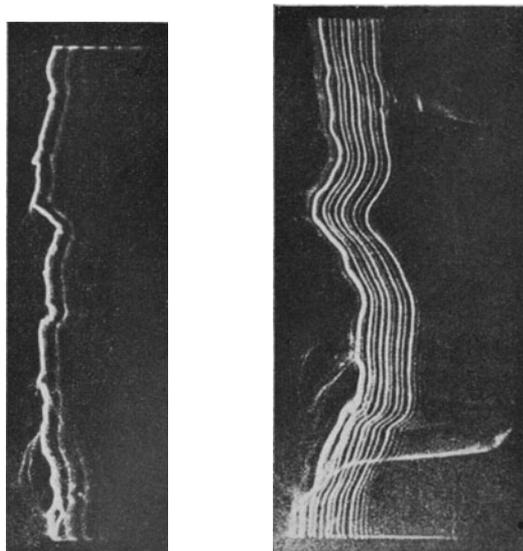


Abb. 14. Funkenentladungen nach B. Walter. Induktor mit Primärkapazität; Funkenlänge 15 cm.

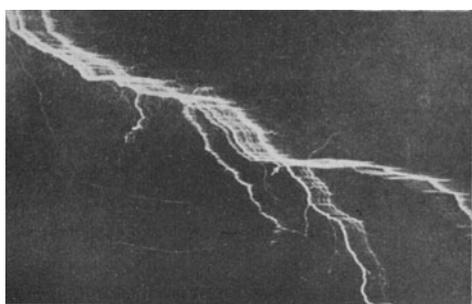
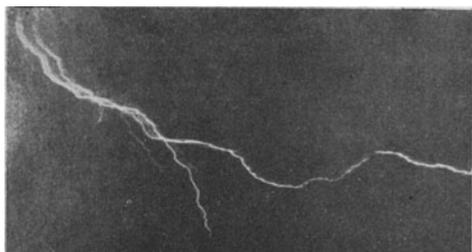


Abb. 15. Blitzaufnahme mit bewegter Kamera nach B. Walter. Das untere Bild ist eine Teilvergrößerung des oberen.

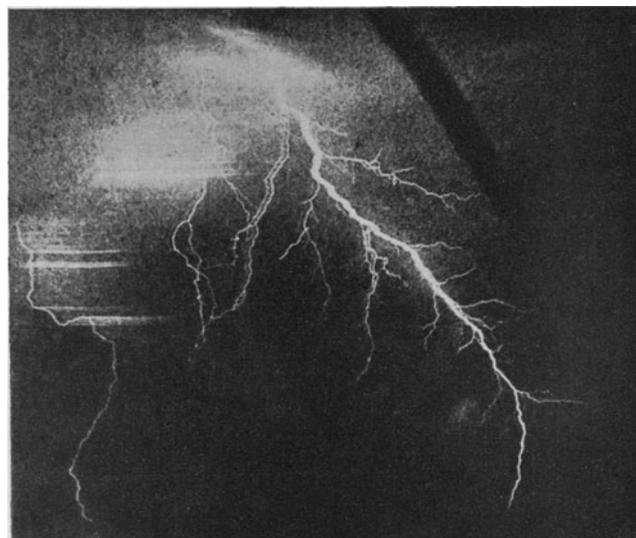


Abb. 16. Blitzaufnahme mit bewegter Kamera nach B. Walter.

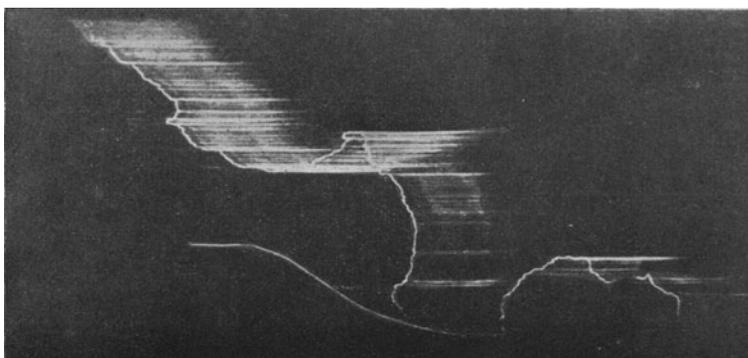


Abb. 18. Blitzaufnahme mit bewegter Kamera nach B. Walter.

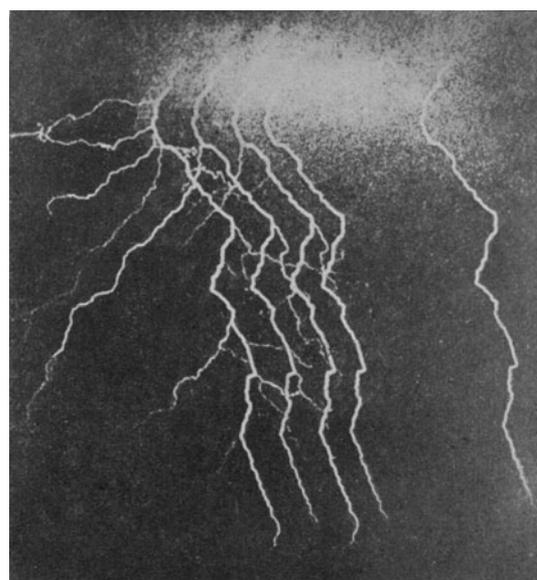


Abb. 17. Blitzaufnahme mit bewegter Kamera nach B. Walter.

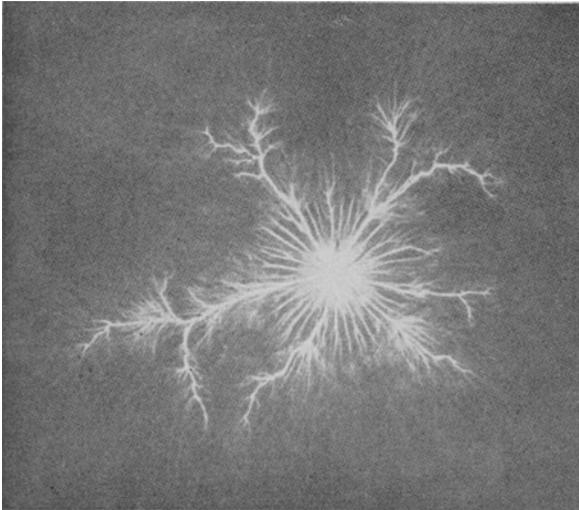


Abb. 23. Positives Gleitbüschel nach M. Toepler.

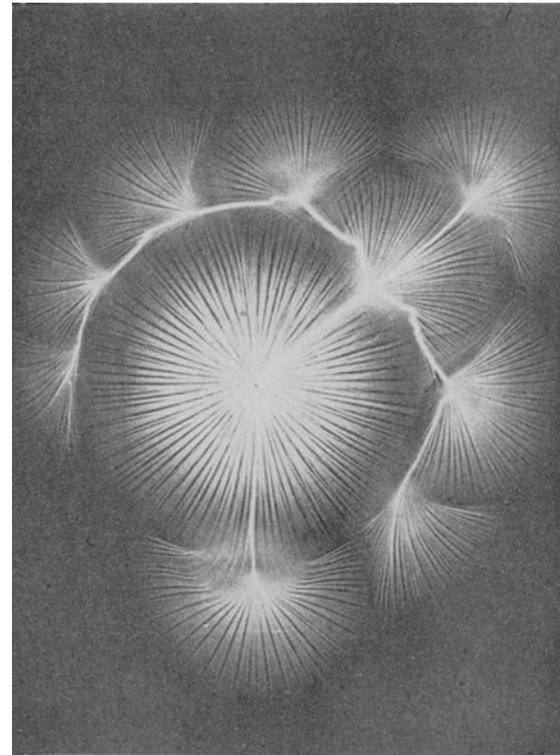


Abb. 24. Negatives Gleitbüschel nach M. Toepler.

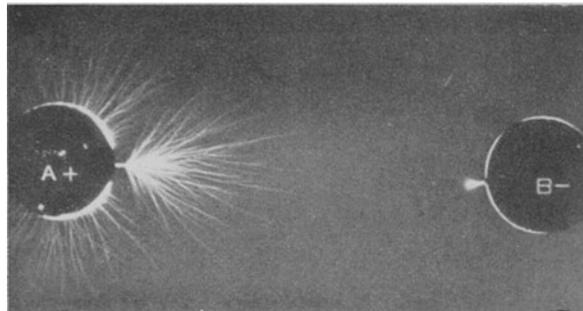


Abb. 25. Büschelentladungen am positiven und negativen Pol nach H. C. Simpson.

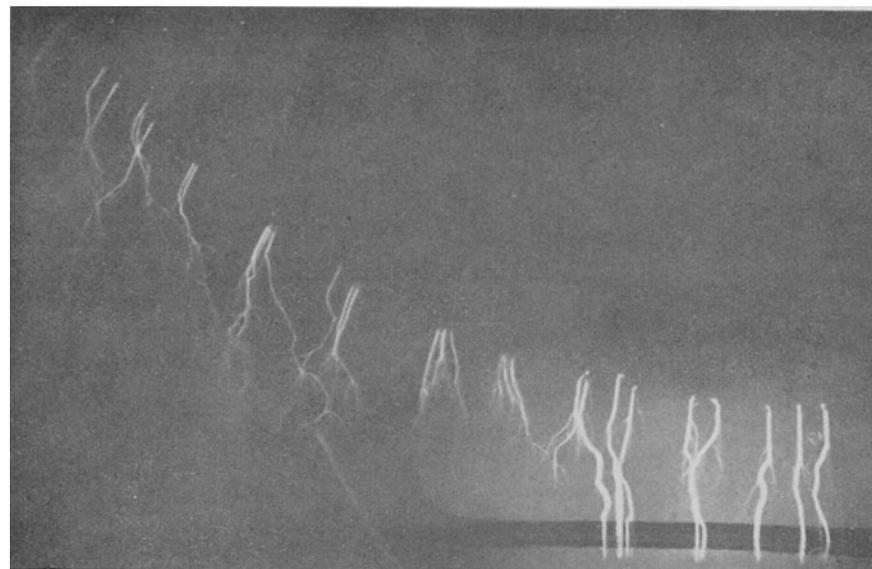


Abb. 26. Entladungen zwischen Kugel und Platte; Kugel als Anode.

Tafel 4.

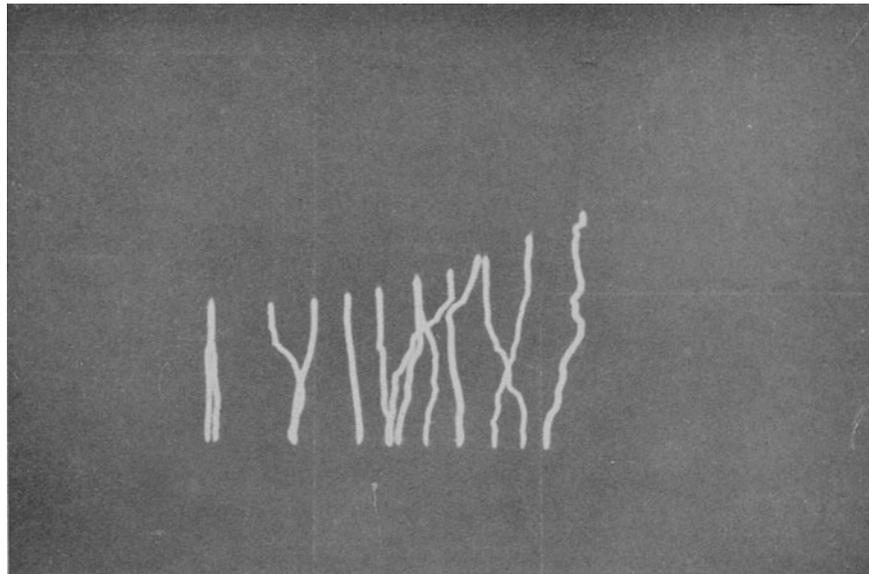


Abb. 27. Entladungen zwischen Kugel und Platte; Kugel als Kathode nach H. C. Simpson.

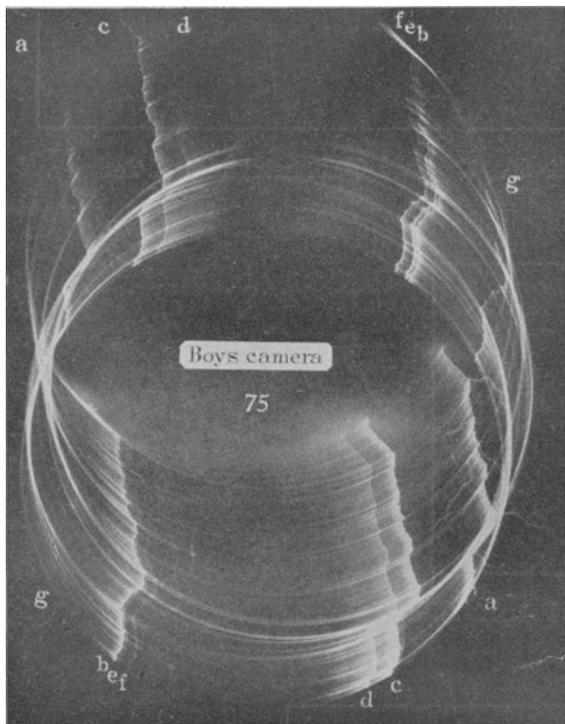


Abb. 31. Blitzaufnahme mittels Boys-Kamera nach B. F. J. Schonland, D. J. Malan und H. Collens.

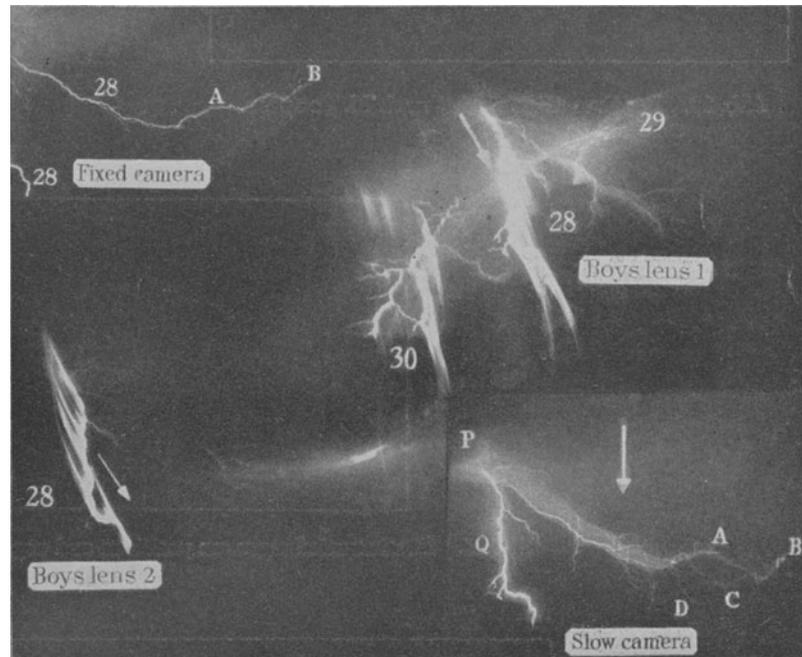


Abb. 33. Aufnahme eines Blitzes mit Boys-, Walter- und feststehender Kamera nach B. F. J. Schonland, D. J. Malan und H. Collens.

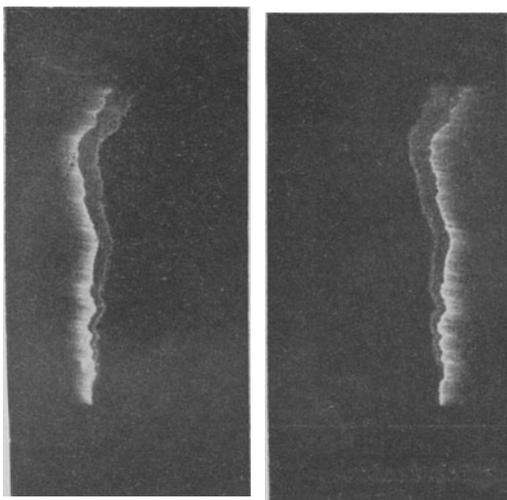


Abb. 32. Boys-Teilaufnahme eines Blitzes nach B. F. J. Schonland und H. Collens.

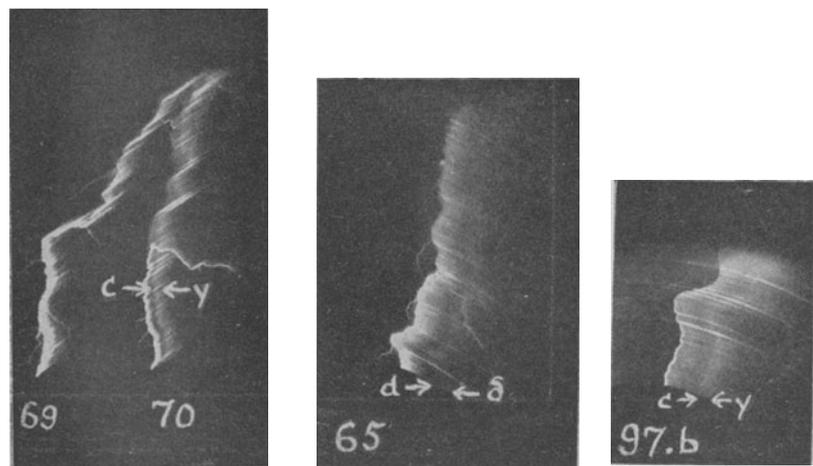


Abb. 37. Vier ausgewählte Blitzaufnahmen nach Schonland, Malan und Collens.