

UNIVERSAL
LIBRARY

OU_220507

UNIVERSAL
LIBRARY

OSMANIA UNIVERSITY LIBRARY

Call No. 537 / k 122 Accession No.

Author Kahler, P. K.

Title Elektrizität der gewitter 1921

This book should be returned on or before the date last marked below.

Sammlung Borntraeger Band 3

Die Elektrizität der Gewitter

von

Dr. K. Kahler

Meteorologisches Observatorium Potsdam
Privatdozent an der Universität Berlin

**OSMANIA UNIVERSITY
COLLEGE LIBRARY.**

Mit 9 Abbildungen

Berlin

Verlag von Gebrüder Borntraeger

W35 Sohöneberger Ufer 12a

1924

Alle Rechte,
insbesondere das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Copyright, 1924, by Gebrüder Borntraeger in Berlin

R. ID. No. 00052356

Inhaltsübersicht

	Seite
Einleitung	5

I. Teil

Die Beobachtungstatsachen

1. Die Gewitterstatistik	7
a) Die Beobachtungsmethoden	8
b) Die Bearbeitung der Meldungen	9
c) Physikalische Schlüsse	11
2. Die meteorologischen Ursachen der Gewitter	14
a) Die Vorgänge im aufsteigenden Luftstrom	14
b) Die Einteilung der Gewitter	17
c) Anwendung der Bjerknesschen Anschauungen auf die Gewitter	36
d) Bestandteile der Gewitterwolken	41
e) Gewitterentstehung und Kolloidforschung	50
3. Allgemeines luftelektrisches Verhalten der Atmosphäre	51
a) Das Leitvermögen	51
b) Das Spannungsgefälle	55
c) Die elektrischen Ströme in der Atmosphäre	59
d) Die Eigenladungen der Niederschläge	60
e) Die Radioaktivität der Niederschläge	68
f) Die Raumladungen der Atmosphäre	68
4. Das Elmsfeuer	73
6. Der Linienblitz	81
6. Der Kugelblitz	95
7. Vulkan- und Staubgewitter	99
8. Gewitter und Funkentelegraphie	102

IL Teil

Die Erklärung der Gewitterelektrizität

	Seite
1. Elektrisierung durch die Sonne	105
2. Elektrische Vorgänge beim Anlagern (durch Adsorption) der Träger.	107
3. Elektrische Vorgänge beim Verdampfen und Verdichten des Wassers	109
a) Das Verdampfen	109
b) Das Verdichten	111
4. Reibungsvorgänge an den Niederschlägen	119
5. Die Lenardwirkung in den Wolken	122
6. Influenzvorgänge an den Niederschlägen	138
Zusammenfassung	148

Einleitung

Die Vorgänge in der Atmosphäre, die wir mit dem Namen Gewitter bezeichnen, haben, so lange es Menschen gibt, in hohem Maße den Verstand und noch mehr die Phantasie der Erdbewohner gefesselt. Das Gewitter ist nun aber nicht nur die auffallendste und schönste, sondern auch die am schwersten zu verstehende Erscheinung der Atmosphäre. Es ist bekannt, wie sehr schon bei den alten Völkern der Glaube und der Aberglaube mit dem Gewitter verknüpft war. Im Alten Testament wird das Gewitter mehrfach erwähnt. Auch auf Kugelblitz und Elmsfeuer kann man, wenn man will, aus mancher Beschreibung schließen. Ähnlich wie die ganze Gesetzgebung der Israeliten auf dem Berge Sinai unter Blitz und Donner erfolgt, stellt auch in der griechischen und germanischen Mythologie Blitz und Donner die größte Macht von Zeus und Odin dar, um die unbotmäßigen Erdenkinder zu züchtigen. In der christlichen Zeit ging vieles davon auf Christus und die Heiligen über, vor allem auf Petrus.

Die moderne Forschung setzt erst ein mit dem Erfinden der Elektrisiermaschine durch O. v. Guericke in der Mitte des 17. Jahrhunderts. Man kann sich nur schwer vorstellen, daß damals nicht gleich die Ähnlichkeit der elektrischen Vorgänge in der Luft mit denen im Laboratorium aufgefallen ist. Es scheint aber, als ob erst der Engländer Watt um 1700 diesen Gedanken ausgesprochen hat. Im nächsten Jahrhundert erfuhr unser Wissen eine große Förderung durch Winkler in Deutschland, der aber wenig Beachtung fand und später ganz in Vergessenheit geriet, sowie durch den Amerikaner Franklin, der durch eine sehr geschickte Werbetätigkeit unterstützt wurde. Kurz nach Franklin sind die ersten exakten Beobachtungen über atmosphärische Elektrizität ausgeführt worden. Im 19. Jahrhundert, vor allem in seiner zweiten Hälfte wurden diese Beobachtungen fort-

gesetzt. Erst die neue Jahrhundertwende brachte entscheidende Fortschritte, vor allem dadurch, daß der Gewitterforschung alle Fortschritte der Physik zugute kamen. Die großen Entdeckungen von Hertz, Röntgen, Lenard in Deutschland, Becquerel und Curie in Frankreich, Rutherford in England über die Leitfähigkeit in Gasen und die radioaktiven Erscheinungen haben unsere Auffassung von den luftelektrischen Vorgängen von Grund aus umgewandelt. Außer Lenard sind es vor allem die beiden ausgezeichneten Wolfenbütteler Physiker Elster und Geitel gewesen, die hier bahnbrechend gewirkt haben.

Das Folgende soll eine Einführung sein in die physikalischen Vorgänge beim Gewitter, zugleich aber eine kritische Darstellung des heutigen*) Standes der Forschung. Die eigentlichen Gewittertheorien, welche die Frage nach dem Ursprung der elektrischen Ladungen beantworten, finden sich erst im zweiten Hauptabschnitt. Ihm voran geht im ersten eine Beschreibung aller für den Gewitter Vorgang in Betracht kommenden meteorologischen und elektrischen Erscheinungen.

*) Mitte des Jahres 1923.

I. Teil

Die Beobachtungstatsachen

1. Die Gewitterstatistik

Die Gewitterstatistik behandelt die geographische Verteilung der Gewitter, sowie ihre klimatologischen Schwankungen. Sie bedient sich dabei freiwilliger Beobachter in allen Teilen des Landes, die an ihrem Wohnort nach gleicher Vorschrift das Gewitter beobachten und darüber nach einer Zentralstelle berichten. Klimatologisch wird eine Erscheinung dann als „Gewitter“ bezeichnet, wenn mindestens ein Donner gehört worden ist. Entfernte Gewitter, deren Blitze gesehen werden, deren Donner aber nicht gehört wird, werden als „Wetterleuchten“ notiert. Das erste solche Beobachtungsnetz wurde im Jahre 1864 von Marié-Davy in Frankreich eingerichtet, 1867 folgte Norwegen (Mohn), 1871 Schweden (Hildebrandson), 1876 Italien (Ferrari), 1879 Belgien (Lancaster) und Bayern (v. Bezold), 1881 Mitteldeutschland (Aßmann in Magdeburg), 1884 Südrußland (Klossowsky) und einige Jahre später auch Preußen (v. Bezold).

Man hat von vornherein gar nicht so große Erwartungen an die Ergebnisse dieser Einrichtung gesetzt. Das erscheint heute, wo man eher zu einer gewissen Überschätzung dieser Forschung zu neigen scheint, fast verwunderlich. Der Altmeister der Meteorologie, Hann¹⁾ sagt bereits 1867 darüber: „Niemand kann jetzt schon sagen, wieviel Neues, teils unsere theoretischen Vorstellungen Bestätigendes, teils sie Berichtigendes dieselben uns noch bringen mögen. Aber völlig neue Enthüllungen über den ‚Ursprung‘ der Gewitter kann ich mir nicht erwarten.“ Am gleichen Ort führt Hann aus: „Es läßt sich kein generelles Unterscheidungsmerkmal aufstellen zwischen einem Gewitter

¹⁾ J. Hann, Über den „Ursprung“ der Gewitter. Österr. Zeitschr. f. Meteorologie 2, 403 (1867).

und einem gewöhnlichen heftigen Platzregen, den der Volksmund hie und da so bezeichnend ein stilles Gewitter nennt. Nur der Grad der Steigerung des bei allen Niederschlägen auftretenden Spannungs- und Ausgleichsprozesses ist es, der dieselben zu Gewittern stempelt. Eine Untersuchung über die Ursprungsstätten der Gewitter fällt dabei völlig zusammen mit jener über die Ursachen einer Steigerung eines sich weit verbreitenden Niederschlags/' Daraus ergibt sich das Unzulängliche eines Gewittermeldedienstes von selbst. Die Gewitterstatistik erfaßt nur einen Teil der Vorgänge. Die sichtbaren und hörbaren elektrischen Erscheinungen sind oft ganz zufälliger Natur. In ihrem gesamten luftelektrischen Verhalten zeigen Böen und Gewitter vielfach überhaupt keinen Unterschied. Die Gewitterstatistik ist also wie Hann*) in seinem „Lehrbuch der Meteorologie“ hervorhebt, in keinem Fall irgendwie für eine Schätzung der elektrischen Energie der Atmosphäre zu verwenden, weil sie wahllos starke und schwache, kurze und lange Gewitter berücksichtigt. Nach Hann liefert ein Alpengewitter mehr Blitze als alle Gewitter in 20 Jahren im höchsten Norden Europas.

a) **Die Beobachtungsmethoden.** Dem Gewitterbeobachten haften außerdem noch mancherlei Mängel an, die sich nie ganz vermeiden lassen. Jeder Wechsel des Beobachters und seines Wohnorts, wie er leider recht häufig vorkommt, bedeutet einen Sprung in der Beobachtungsreihe. Verschiedene Beobachter sind stets auch verschieden sorgfältig. Die Lebensgewohnheiten, der Beruf, die Lage des Wohnorts sind da von großem Einfluß, vor allem bei den Nachtgewittern. Am auffälligsten trat das hervor bei den von Trabert²⁾ bearbeiteten erstmaligen Ergebnissen des niederösterreichischen Stationsnetzes. Ein sehr eifriger Beobachter hatte in einem Jahr nicht weniger als 104 Meldungen abgesandt; dagegen notierten einige weniger aufmerksame Beobachter in derselben Zeit nur 5. Beide, der zu eifrige und die unaufmerksam Beobachter mußten bei der Bearbeitung des Materials außer Betracht bleiben. Selbst ein sehr erfahrener Beobachter ist häufig im Zweifel darüber, wie er an einem gewitterreichen Tage die Gewitter trennen soll. Oft ziehen wirklich

*) J. Hann, Lehrbuch der Meteorologie, 3. Aufl. 1915, S. 667.

²⁾ W. Trabert, Ergebnisse der Beobachtungen des niederösterreichischen Gewitterstationsnetzes im Jahre 1901. Jahrb. d. k. k. Centralanstalt f. Meteorologie* u. Erdmagnetismus 1901 E. 25. Wien 1903.

mehrere Gewitter gleichzeitig vorüber, oft kann aber auch wechselnde Bewölkung die Auffassung bringen, daß mehrere Gewitter auftreten, während in Wirklichkeit nur eines in breiter Front vorüberzog. Vor allem die Zahl der Ferngewitter, d. i. der in mehr als 3 km Entfernung vorüberziehenden, wechselt sehr von Ort zu Ort. Sie hängt offenbar ganz von dem Interesse des Beobachters ab. Und dabei umfassen die Ferngewitter etwa die Hälfte aller Meldungen.

Sogar die Beobachtungsmethode ist nicht in allen Ländern gleich. In Deutschland wird in erster Linie die Zeit des ersten Donners in mitteleuropäischer Zeit notiert und gemeldet. In der Tat erregt ja der erste Donner die meiste Aufmerksamkeit. Die Methode hat aber den Nachteil, daß schwache Donner im Zimmer oder an geräuschvollen Orten viel zu spät gehört werden. Deswegen wird in Italien schon seit Ferrari statt des ersten Donners die Zeit der stärksten Gewittertätigkeit in die Meldekarten eingetragen. Das hat aber ebenfalls Nachteile. Oft steht ein Gewitter lange Zeit über einem Ort, noch häufiger treten innerhalb eines längeren Zeitraums mehrere nahe Entladungen ein, zwischen denen schwer die stärkste herauszufinden ist. Auch bei den Meldungen der deutschen Stationen muß der Beobachter angeben, wann das Gewitter am nächsten war, d. h. er muß die Zeit heraussuchen, wo die Zwischenzeit zwischen Blitz und Donner am kleinsten ist. Davis hat als bestes Beobachtungs- und Meldemittel den Regenanfang bei einem Gewitter vorgeschlagen. Nach dieser Methode wird in den Niederlanden und in Nordamerika beobachtet. Es gibt aber bekanntlich viele Gewitter, vor allem Ferngewitter, die am Beobachtungsort keinen Regen bringen.

b) Die Bearbeitung der Meldungen. Für die Bearbeitung der Meldekarten auf der Zentrale ist wesentlich die gleichzeitige Darstellung der Gewitterfront im ganzen Gebiete der Gewittertätigkeit. In Deutschland werden die „Isobronten“ gezeichnet, die Linien des gleichen ersteh Donners, d. h. es werden alle die Orte auf einer Landkarte miteinander verbunden, die gleichzeitig den ersten Donner gehört haben. Da sich die Gewitter wie alle Niederschläge in breiter Front über große Länderstrecken fortpflanzen, so erhält man in der Tat ein anschauliches Bild der Vorgänge. Diese Darstellung gibt ferner unmittelbar die Möglichkeit, ein Gewitter vorauszusagen: Falls nur die Meldung eines sich bildenden Gewitters schnell in der Zentrale eingeht, ist es von hier aus möglich, die Gebiete zu warnen, in die es erfahrungs-

gemäß zieht. In Italien werden statt der Isobronten die Isochronen gezeichnet. Die richtige Beurteilung des an der Zentrale eingegangenen Materials ist, wie schon Ferrari³⁾ hervorhebt, trotz langjähriger, Erfahrung keine leichte und einfache Sache. Man muß stets jeder Beobachtung das richtige Gewicht zu geben wissen und daneben Einsicht in den allgemeinen Verlauf der Erscheinung besitzen. Vor allem muß man alle anderen meteorologischen Vorgänge mit heranziehen. Oft stellt es sich als ein großer Fehler heraus, wenn gleichartige Gewittererscheinungen in entfernten Gebieten durch Linien miteinander verbunden werden. Ferner ist es oft umgekehrt schwer, gleichzeitig auftretende Gewitterzüge voneinander zu trennen. Das Hauptgewitter muß vielfach erst herausgeschält werden. Dabei ist noch ganz abgesehen worden von groben Unrichtigkeiten, die stets in den Gewittermeldekarten enthalten sind, wie falsche Zeiten, verkehrte Himmelsrichtungen, verwechselte Windrichtungen usf. Ferrari zeigt, daß ein konstantes Fortpflanzen der Gewitter in Italien eigentlich zu den Seltenheiten gehört, daß vielmehr meistens sich neue Ursprungszentren bilden, die das Isochronenbild beeinflussen. Solche neuen Zentren unterscheidet er drei. 1. Es bildet sich am Rande der Isochronen und bewegt sich mit dem alten Gewitter fort, 2. Es bildet sich mitten im Verlauf des alten Gewitters und schreitet mit diesem fort. 3. Es bildet sich im alten Gewitter, wobei jedoch das alte erlischt.

Die Gewitterstatistik zählt, um ein Bild von der Gewittertätigkeit eines Ortes für einen längeren Zeitraum zu erhalten, die Zahl der Tage mit Gewittern. Darunter ist verstanden jeder Tag, an dem Gewitter vorkamen, ganz gleich, ob es zehn waren oder nur eines. Es ist klar, daß dieses Bild unvollständig wird. Deswegen hat Schmauß für Bayern (im Jahrbuch 1914) die Statistik so erweitert, daß auch jede Stunde, in deren Verlauf Donner gehört wird, gezählt wird. Außerdem spielt in der Statistik eine große Rolle die Zahl der zündenden Blitzschläge, sowie die der vom Blitz getöteten Menschen. Gerade hier hat sich der recht zweifelhafte Wert solcher Zählungen herausgestellt. Lange Zeit hat man aus der Statistik der Blitzschläge auf eine Zunahme der Blitzgefahr für Gebäude, aus der Statistik der getöteten Menschen auf eine Abnahme der Gefahr schließen wollen. Der Trugschluß entstand im ersten Fall dadurch, daß wegen der wachsenden

³⁾ Ciro Ferrari, Beiträge zur Gewitterkunde. Meteorol. Zeitschr. 5, 1 u. 62 (1888).

Zahl der Gebäude, vor allem wegen der zunehmenden Industrialisierung Deutschlands die Anzahl der zündenden Schläge in der Tat für viele Gegenden zunahm, dividiert durch die Zahl der Gebäude aber doch konstant blieb; im zweiten Fall dadurch, daß durch das Zusammendrängen der Menschen in den Städten eine scheinbare Abnahme der Gefahr vorgetäuscht wurde. Auf dem Lande scheint die Gefahr eher etwas größer geworden zu sein, was sich durch Vermehrung der Drahtleitungen und Drahtzäune erklären könnte.

C) Physikalische Schlüsse. Nun darf man aber natürlich bei aller berechtigten Kritik nicht verkennen, daß die klimatologische Gewitterkunde von großem Wert ist. Außer ihrem unmittelbaren praktischen Nutzen, beispielsweise für die Brand- und Hagelversicherung, ist sie für die Länder- und Klimakunde von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Wenn sie auch niemals imstande sein wird, die eigentlichen physikalischen Ursachen der Gewitter aufzuklären, so lassen sich doch schon aus ihr eine Reihe von solchen Schlüssen ziehen. Die Gewitter sind in den Tropen am regelmäßigsten und zahlreichsten; in den Polargebieten dagegen ganz selten. Daraus folgt, daß ihre Entstehung oft mit der Sonnenwirkung zusammenhängt. Derselbe Schluß läßt sich ziehen aus dem jährlichen Gang der Gewitter in den gemäßigten Zonen, sowie aus dem täglichen Gang, der an den meisten Orten einen Höchstwert in den ersten Nachmittagsstunden, zurzeit der höchsten Temperatur, aufweist. Doch zeigt die genauere Statistik, daß der Vorgang nicht ganz so einfach ist. Der Winter ist nur im Binnenland gewitterleer, an der Küste und auf dem Meere aber im Verhältnis zum Land fast gewitterreich; das Frühjahr ist im Binnenland gewitterreich, der Herbst gewitterarm. Der gewitterreiche Sommer hat, wie v. Bezold zuerst gezeigt hat, zweimal erhöhte Tätigkeit, die durch die Kälterückfälle des Juni getrennt sind. Auch der tägliche Gang weist beim genaueren Studium mancherlei Eigentümlichkeiten auf. So ist an der Küste und auf den Inseln häufig nachts die Gewittertätigkeit stark, bisweilen stärker als am Tage. Ebenso sind die Ozeangewitter nachts häufiger, auch die Wintergewitter im Binnenland. Hier scheinen Zusammenhänge zu bestehen zwischen den Stürmen und Gewittern, vielleicht auch zwischen Änderungen in den Tiefdruckgebieten, die meistens nachts oder frühmorgens erfolgen.

Eine große Rolle spielt ferner die Luftfeuchtigkeit. Schon aus der Tatsache, daß die Steppen und Wüsten, sowie die regenarmen

Küsten und die Mitten der Passatgürtel gewitterarm oder -leer sind, geht die große Bedeutung des atmosphärischen Wasserdampfes für die Gewitterbildung hervor. In den Gebieten der wärmeren Meeresströmungen kann im Gegensatz dazu die Gewittertätigkeit recht rege werden, wie das Koppen⁴⁾ für den nordatlantischen Ozean zeigte. Es bestehen ferner enge Zusammenhänge zwischen Gewittern und den mit ihnen verbundenen Niederschlägen, die vor allem von Arendt in den „Veröffentlichungen des Preußischen Meteorologischen Instituts“: „Ergebnisse der Gewitterbeobachtungen“ verfolgt worden sind.

Es ist versucht worden, aus den längeren Reihen der Gewitterstatistik auf Perioden der Gewittertätigkeit zu schließen. Von den kürzeren Perioden ist schon der Einfluß der Gezeiten, der beispielsweise an der deutschen Nordseeküste allgemein angenommen wird, unsicher; ebenso ist die 26tägige Periode, die v. Bezold⁵⁾ gefunden zu haben glaubte, nicht bestätigt, worden. Auch der Mondeinfluß tritt wenig hervor. Nach der Statistik scheinen die Gewitter bei Neumond etwas häufiger zu sein als bei Vollmond. Die von v. Bezold 1874 gefundene Sonnenfleckenperiode, wonach bei einem Sonnenfleckenmaximum die wenigsten Blitzschläge eintreten, ist sicher nicht umgekehrt gültig; denn die Statistik der Blitzschläge zeigt weit mehr Höchstwerte als die Sonnenflecken. Aus den mehr als 100jährigen Gewitteraufzeichnungen von Zürich schließt Maurer⁶⁾ auf keinerlei Zu- oder Abnahme der Gewitterhäufigkeit im Laufe dieses langen Zeitraums.

Eine Reihe von Schlüssen lassen sich aus der Fortpflanzung der Gewitter ziehen: In Mitteleuropa kommen die Gewitter fast zur Hälfte aus dem westlichen Quadranten. Sie ziehen auch dann häufig aus Westen, wenn der Unterwind östlich, also ihnen entgegen ist: Die Gewitter folgen im allgemeinen den oberen Luftströmungen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit läßt sich dann gut bestimmen, wenn der Verlauf der Isobronten einigermaßen regelmäßig ist. Ein Gelände-

⁴⁾ W. Koppen, Die jährliche räumliche Verteilung der Gewitter und Böen auf dem nordatlantischen Ozean und dessen Küsten. *Annal. d. Hydrographie u. maritimen Meteorologie* 46, 69 (1918).

⁵⁾ W. v. Bezold, Über eine nahezu 26tägige Periodizität der Gewittererscheinungen. *Sitzungsberichte der Berliner Akademie der Wissenschaften* 36, 1 (1888).

⁶⁾ J. Maurer, Die säkulare Schwankung der Gewitterhäufigkeit in Zürich. *Meteorol. Zeitschr.* 36, 289 (1918).

einfluß ist zweifellos in vielen Fällen, vor allem im Hochgebirge vorhanden. Nach Börnstein⁷⁾ ziehen die Gebirge ein Gewitter derartig an, daß sie sein Herannahen beschleunigen, dann aber sein Abziehen verlangsamen. Fraglich ist, trotzdem manche Beobachtungen, so von Börnstein, dafür zu sprechen scheinen, der Einfluß von Flußläufen. Es scheint, als ob lokale Wärmegewitter in ihrem Zuge dadurch aufgehalten werden können. Im Sommer, wenn die Gewässer kälter sind als die Luft, könnte man sich das wohl vorstellen; im Winter, wo es umgekehrt ist, versagt aber diese Erklärung.

Wichtig ist ferner die Frage: Wieweit wirkt das Gelände auf die Entstehung der Gewitter ein? Schon die räumliche Verteilung in den Gewitterkarten läßt vielfach Schlüsse zu auf diese „Gewitterherde“. Doch hebt schon Ferrari hervor, wie verwickelt sich die Verhältnisse meistens gestalten. Nur ganz ausnahmsweise ist der Ursprungsort ein Punkt, von dem sich dann das Gewitter wellenförmig ausbreitet. Prohaska, der ausgezeichnete Erforscher der ostalpinen Gewitter, betont, daß in Steiermark und Kärnten in den Gegenden, die seit Jahren als gewitterreich bekannt sind, auch viele Gewitter ihren Ursprung haben. Anderseits erlöschen gerade dort viele Gewitter. Kürzlich hat Langbeck⁸⁾ aus dem norddeutschen Beobachtungsmaterial der Jahre 1901—1910 nach einem etwas abgeänderten Verfahren aus der räumlichen Verteilung der Gewitter die Häufigkeit ihrer Entstehung untersucht. Er beschränkte sich auf die großen Gewitterzüge, ließ also lokale und Einzelgewitter dabei fort. Die Arbeit bringt in erster Linie neue Beiträge zur Landeskunde Norddeutschlands. Die Gewitterbildung ist überall da stark, wo durch das Nebeneinander von Land und Meer, Berg und Tal oder allgemein von kalten und warmen Luftströmungen Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede entstehen. Diese „regionalen Eigenschaften“ überwiegen durchaus die „bodenphysikalischen Einflüsse“.

Beachtung verdient schließlich noch eine Erscheinung, auf die besonders Hann mehrfach hingewiesen hat, das ist die regelmäßige

⁷⁾ R. Börnstein, Die Gewitter vom 13. bis 17. Juli 1884 in Deutschland. Referat von W. Köppen. Meteorol. Zeitschr. 4, 445 (1887).

⁸⁾ K. Langbeck, Inwieweit ist ein Einfluß der Geländebeziehungen auf die Entstehung der Gewitter anzunehmen? Das Wetter 39, 65 u. 107 (1922). - Die regionalen Besonderheiten der Gewitterentstehung in Norddeutschland. Meteorol. Zeitschr. 39, 257 (1922).

Aufeinanderfolge von Gewitterzügen. Die häufigste und natürlichste Periode ist die 24stündige, die Hann⁹⁾ bereits 1863 genau untersucht hat. „Der nächste Tag, auch der völlig reine Morgen darf uns nicht irre machen, bringt eine Wiederholung der Gewitterbildung, gewöhnlich schon zu einer etwas früheren Stunde und bei geringerer Wolkenhöhe.“ Die Erklärung liegt ja nahe; es ist die lokale Erwärmung des Bodens und der untersten Luftschichten durch die Sonne. Nun finden sich aber in den Gewitterkarten auch aufeinanderfolgende Gewitterzüge mit kürzeren Zwischenzeiten. Ferrari³⁾ gibt als häufigstes Intervall 3 Stunden oder ein Vielfaches davon an. Süring¹⁰⁾, der die norddeutschen Meldungen von 1901—1905 daraufhin bearbeitet hat, zeigt, daß die Aufeinanderfolge am ehesten bei den Böengewittern der kälteren Jahreszeit zu erkennen ist. Sie weisen meistens Zeitunterschiede auf von $1\frac{1}{4}$, $2\frac{1}{2}$ und 5 Stunden und sind durch Ausbuchtungen des Isobarenverlaufs zu erklären. Schwieriger ist es bei den Wärmegewittern, bei denen oft die Luftdruckverteilung recht gleichmäßig ist. Es handelt sich bei ihrer regelmäßigen Aufeinanderfolge vielleicht um periodisch wiederkehrende Dichtigkeitsunterschiede der Luft. Langbeck¹¹⁾ knüpft für eine Erklärung an eine Bemerkung von Barkow an, der bei seinen Untersuchungen über die Struktur des Windes es für möglich hält, daß die von ihm gefundene kurzperiodische Schwankung der Windunruhe die Aufeinanderfolge der Gewitter auslösen könnte. Die Vorgänge müssen von Ort zu Ort sehr wechseln, weil zu den Schwingungen der Luft Interferenzerscheinungen hinzutreten.

2. Die meteorologischen Ursachen der Gewitter

a) **Die Vorgänge im aufsteigenden Luftstrom.** Während die Gewitterstatistik die Gewitter als eine auf Auge und Ohr wirkende Naturerscheinung auffaßt, lautet die meteorologische Definition: Das Gewitter ist ein mit sichtbaren und hörbaren elektrischen Entladungen

⁸⁾ Siehe Seite 10.

⁹⁾ J. Hann, Die Mittagsgewitter in den Alpentälern. Mitteilungen des österreichischen Alpenvereins 1, 109 (1863).

¹⁰⁾ R. Süring, Über die Aufeinanderfolge von Gewitterzügen. Meteorol. Zeitschr., Hannband, 339 (1906).

¹¹⁾ K. Langbeck, Der Tagesgang in der Entstehung der Gewitterzüge und eine hypothetische Erklärung für deren periodische Aufeinanderfolge. Meteorol. Zeil sehr 39, 298 (1922).

verbundener Kondensationsvorgang des atmosphärischen Wasserdampfes (Hann). Ohne Wolken ist kein Gewitter möglich. Die sichtbaren und hörbaren Entladungen sind also nicht das Wesentliche der Erscheinung, das Wesentliche ist vielmehr der Kondensationsvorgang und die Regenbildung, die man früher nur für Begleiterscheinungen hielt. Aber auch heute noch ist, wie Schmauß⁴⁶⁾ hervorhebt, das letzte Stadium der Niederschlagsbildung noch recht geheimnisvoll.

Die Regenbildung in der Atmosphäre entsteht durch thermodynamische Vorgänge in bewegter Luft, und zwar rührt die Wolkenbildung fast ausschließlich von der Abkühlung der Luft her. Möglich wäre noch eine Kondensation durch plötzliche Druckzunahme, doch kommt das, wenn überhaupt, in der Atmosphäre nur selten vor. Die Abkühlung erfolgt wiederum in der Hauptsache durch Ausdehnung ohne Wärmezufuhr (adiabatische Abkühlung). Die Temperatur muß deswegen sinken, weil der sich ausdehnenden Luft die dazu nötige Arbeitsleistung in Form von Wärme entzogen wird. Auf diese Weise wird der Sättigungszustand in bezug auf den Wasserdampf erreicht und unterschritten, so daß ein Teil des überschüssigen Wasserdampfes sich ausscheiden muß. Dabei wird wieder die Verdampfungswärme des Wassers frei, welche die Abkühlung der Luft bremst. Diese Gegenwirkung wird vor allem bei Luft von hoher Temperatur, die viel Wasserdampf enthält, merklich sein, so daß sich wärmere Luft weniger abkühlt als kältere. Weil die dünnere gesättigte Luft in der Höhe bei gleicher Temperatur leichter ist und weniger Wasserdampf enthält als die dichtere gesättigte Luft am Erdboden, so wird die Wärmeabnahme oben geringer sein als unten. Hann*) zeigt, daß gesättigte Luft von 15° bei gleicher Abkühlung einen dreimal so starken Niederschlag liefern muß als Luft von —5°. Gleichzeitig ist aber auch die Arbeitsleistung, also die Wärmeentziehung bei der gesättigten warmen Luft größer als bei der gesättigten kalten. Die gleiche Wärmeentziehung kühlt demnach die gesättigte warme Luft ganz bedeutend weniger ab als die gesättigte kalte. Diese Verhältnisse sind bei den Vorgängen in der Atmosphäre von größter Bedeutung.

Der Vorgang, bei dem am ehesten und häufigsten starke Abkühlung eintritt, ist die aufsteigende Bewegung der Luft. Diese spielt

*) Hann, Lehrbuch der Meteorologie 3. Aufl., 1915, S. 245.

⁴⁶⁾ Siehe Seite 50.

nach Hann die allerwichtigste und allgemeinste Rolle bei der Niederschlagsbildung, wobei es zunächst einerlei ist, wie diese Bewegung zustande kommt. Aufsteigende trockene Luftmassen kühlen sich für je 100 m Aufstieg um 1° ab. Sobald aber der Wasserdampf sich zu verdichten anfängt, wird die Abkühlung kleiner, und zwar hängt das ab von der Temperatur und von der Höhe der Luft. Eine Abkühlung der Luft und damit eine Möglichkeit für die Niederschlagsbildung kann ferner eintreten, wie v. Bezold¹²⁾ gezeigt hat, durch Mischung zweier gesättigter feuchter Luftmassen von verschiedener Temperatur. Dabei kondensiert sich ein Teil des Wasserdampfes der wärmeren Luft. Doch kommt anscheinend ein solcher Vorgang in der Natur so gut wie nicht vor, wenigstens nicht im großen. Vielleicht kann er an der Grenze zweier verschiedener Luftströmungen mitsprechen, sowie mitten in Böen und Gewittern, wobei ja eine reichliche Luftmischung eintreten muß.

Zu erwähnen ist noch, daß in der Wolke und ganz allgemein in Luft, die nebeneinander flüssige oder feste Wasserteilchen enthält, eine Verdunstung stattfinden muß, die wieder mit Abkühlung verbunden ist. Dieser Vorgang spielt mitunter in den neueren Gewittertheorien eine Rolle.

Die Bildung der Gewitterwolken geht meistens folgendermaßen vor sich. Die infolge der Sonnenwirkung aufsteigende, wasserdampf haltige Luft dringt weit über die 0° -Isotherme der Atmosphäre empor, wird überkaltet und dann plötzlich ihren Wasserdampf zu Graupeln oder Tropfen verdichten. Infolge der entstehenden Kondensationswärme entsteht ein neuer Auftrieb, wobei sich die gewaltigen Cumuluswolken in Form von Bergen, Türmen, Ambossen bilden, die meteorologisch cumulo-nimbus genannt werden. Sie sind dabei fast immer von einem Eiswolkenschleier umgeben, dem cirrus- oder cirro-stratus-Schirm, früher fälschlich falscher cirrus, besser Gewittercirrus genannt. Dieser Schirm wächst meistens aus der Cumulusmasse heraus und breitet sich horizontal aus, am häufigsten so, daß sich dabei die obere Kuppe des Cumulus verflacht. Erst dann beginnen die Auslösungen der Niederschläge und damit die eigentlichen Gewittererscheinungen. Am schönsten ist diese Wolkenbildung in den Tropen

¹²⁾ W. v. Bezold, Zur Thermodynamik der Atmosphäre. 3. Mitteilung. Luftmischung. Berliner Sitzungsberichte 19, 355 (1890).

zu beobachten, in unserem Klima auch nachmittags in den Gebirgstälern. Vielfach sind schon vormittags gewisse Anzeichen für die spätere Gewitterbildung vorhanden. So tritt bei der ersten Cumulusbildung oder schon vorher meistens im alto-cumulus die sogenannte castellatus-Form auf. Es sind das flache Wolkenschichten, aus denen eine Reihe von kleinen Köpfen türmchenähnlich herauswachsen. Sie deuten auf das Vorhandensein starker aufsteigender Luftströme hin; die Form selbst ist unbeständig und verschwindet bald wieder, um der allgemeinen cumulus-Bildung Platz zu machen, die später in die cumulo-nimbus-Bildung übergeht. Während durch die Niederschläge diese Wolkenform aufgelöst wird, bleiben die mit ihr verbundenen Cirren vielfach erhalten und ziehen mit den oberen Luftströmungen weiter.

Von dieser Bildung der Gewitterwolken treten, vor allem in der kälteren Jahreszeit, mancherlei Abweichungen ein. Oft ist vom Erdboden aus nichts zu sehen als ein gleichmäßiges Wolkengrau, das aus cirrostratus und altostratus allmählich entstanden ist und in Regen und Gewitter übergeht. Ein Gewitter kann sogar plötzlich mitten in einem Landregen auftreten, ohne daß, wie es vor der Böenbildung regelmäßig zu sein pflegt, die Wolkendecke aufgerissen war.

Auf hohen Bergen sind die Erscheinungsformen des Gewitters anders als in der Ebene. Die schönste, mir bekannt gewordene Schilderung eines Berggewitters gibt Trabert¹³⁾ vom Sonnblick. Man sieht keine dunklen Wolken heraufziehen, hört nicht wie in der Ebene lange vorher den Donner, fühlt keine Geschwitterschwüle, sondern wird durch den ersten starken Blitzschlag überrascht. Während der Donner meistens äußerst schwach ist, sind diese Blitze förmliche Feuersäulen. Der Berg ist dabei dauernd in dichten Nebel gehüllt. Graupel und Hagel prasseln nieder. Sehr stark sind vor allem auch die Elmsfeuererscheinungen. Tritt doch einmal ein heftiger Donner auf, so ist das ein Zeichen dafür, daß die eigentliche Gewitterwolke bedeutend höher ist als der Berg.

b) Die Einteilung der Gewitter. Mohn hat zwei Gewitterarten unterscheiden gelehrt: die Wärmegewitter und die Wirbelgewitter. Auch heute noch wird diese Einteilung beibehalten, wenn auch häufig Fälle vorkommen, wo man nicht anzugeben vermag, in welche Kategorie

¹³⁾ W. Trabert, Elektrische Erscheinungen auf dem Hohen Sonnblick (3100 m) Meteorol. Zeitschr. 6, 342 (1889).

sie gehören. Die Wärmegewitter umfassen den größten Teil der Gewitter. Sie entstehen durch die Überhitzung der untersten Luftschichten und die Gleichgewichtsstörungen, die dadurch herbeigeführt werden. In den Wetterkarten liegt ihr Ursprungsort in flachen, oft kaum erkennbaren Tiefdruckgebieten oder in einem Luftdrucksattel zwischen zwei Gebieten hohen Drucks, vorausgesetzt, daß keine stärkeren Luftströmungen vorhanden sind. Zu den Wärmegewittern gehören nicht nur die an ganz warmen Tagen, sondern auch Abend- und Nachtgewitter, die größtenteils vorher entstanden und dann weitergezogen sind, aber sich auch nachts noch bilden können. Charakteristisch für die Wärme- und verwandten Gewitter ist, daß auf sie kein Witterungswechsel folgt. Am nächsten Tage kann wieder genau dasselbe Wetter herrschen. Das Gleichgewicht, vor allem das Temperaturgleichgewicht, ist also durch das Gewitter wieder hergestellt worden. Vielfach geht nach Hann die Erwärmung nicht vom Boden aus vor sich, der sich inzwischen längst wieder abgekühlt hat, sondern von den oberen Luftschichten aus, so daß also sehr wohl Gewitter auftreten können, bei denen am Erdboden kaltes Wetter herrscht. Das Wesentliche für die Wärmegewitter sind Luftdichteunterschiede in der Vertikalen.

Die Wirbel- oder Prontgewitter sind nach Hann die Begleiter der zentralen Teile tiefer Depressionen (Luftdruckwirbel), an deren S- und SO-Rand sie sich am häufigsten bilden. Sie ziehen meist in großer Front, oft auch mit recht großer Geschwindigkeit gleichzeitig mit den Tiefdruckgebieten fort. Während die Wärmegewitter ihre Energie aus der Sonnenwirkung auf den Boden und die bodennahen Schichten schöpfen, wird sie bei den Frontgewittern der allgemeinen Luftströmung der Tiefdruckgebiete entnommen. Auch die Frontgewitter treten vorzugsweise bei heißem oder warmem Wetter ein. Sie unterscheiden sich aber dadurch von den Wärmegewittern, daß sie meistens einen Wetterumschlag einleiten, also von kühlem, veränderlichem Wetter abgelöst werden. Nach v. Bezold¹⁴) ist das Gemeinsame der beiden Gewitterarten die Erzeugung eines labilen Gleichgewichts in der Atmosphäre, und zwar kann das entstehen 1. durch Überhitzung der untersten Luftschichten, 2. durch starke Abkühlung

¹ *) W. v. Bezold, Über Gewitterbildung und labiles Gleichgewicht der Atmosphäre. Meteorol. Zeit sehr. 12, 121 (1895).

der oberen Schichten etwa durch Ausstrahlung und Verdunstung, 3. durch Verzögerung in der Veränderung des Aggregatzustandes, einmal infolge Übersättigung der Luft mit Wasserdampf, dann durch Überkaltung des in den Wolken vorhandenen Wassers. Der letzte Grund kommt aber nach Hann kaum in Frage, weil die plötzliche Kondensation des Wassers eine Druckzunahme zur Folge haben müßte, die aber bekanntlich gerade in der Höhe fehlt. Die Druckstufen „Barographennasen“, die fast stets mit dem Gewitter verbunden sind, reichen nach Margules nur etwa bis 2000 m Höhe. Sie entstehen fast immer durch plötzliche Verdrängung der warmen Luft in den unteren Schichten durch kältere.

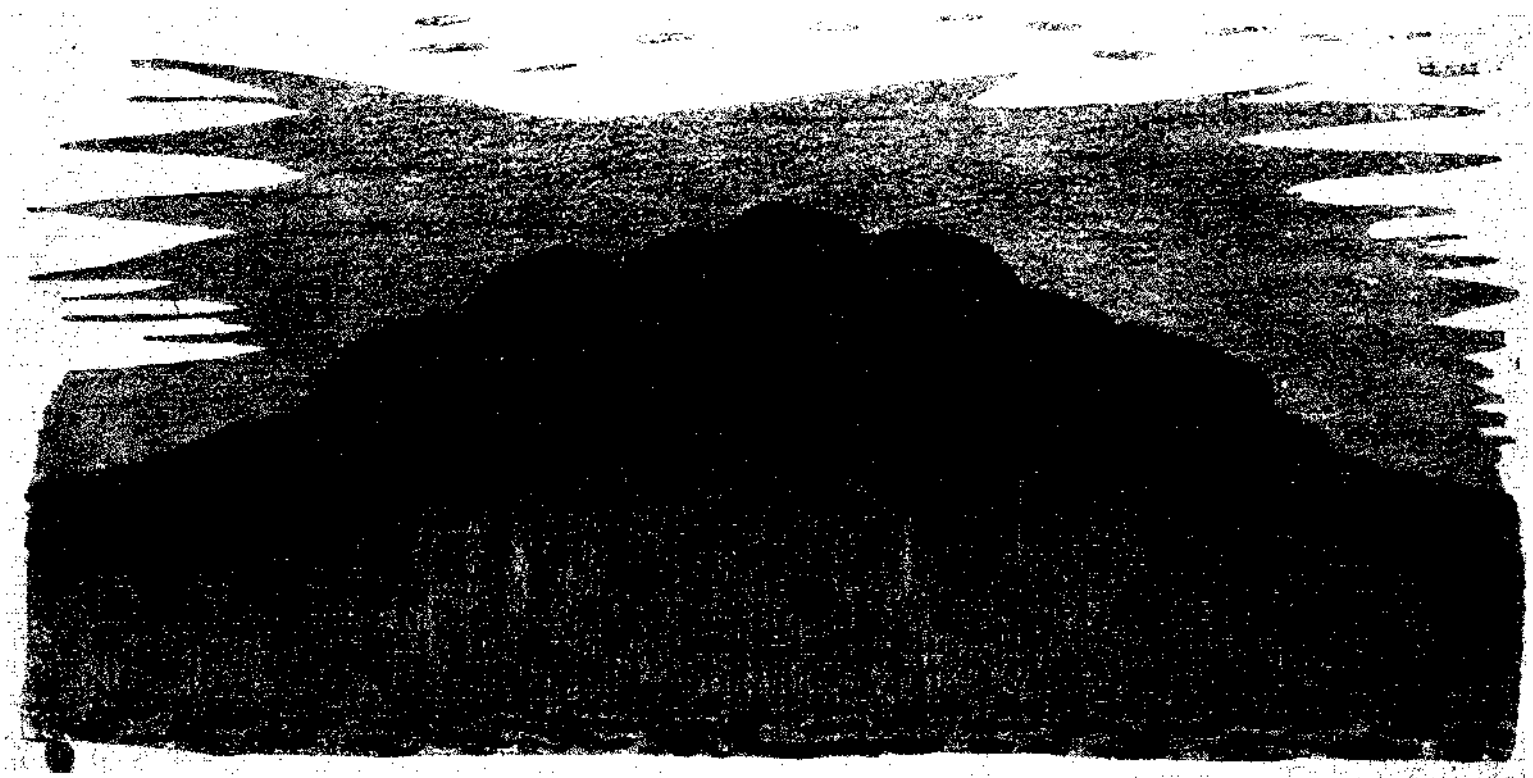
Zu den Frontgewittern gehören auch die Gewitterböen. Bekanntlich ist außer der Luftdruckstufe fast immer mit dem Gewitter, auch dem lokalen Wärmegewitter, eine plötzliche starke Windauffrischung, vielfach auch Winddrehung verbunden, die man kurz als Bö bezeichnet. Koppen¹⁵⁾ hat vor allem diese Böen untersucht, die ja nicht nur in den Gewittern auftreten. Im Gegenteil scheint bei den Böen die elektrische Begleiterscheinung oft ganz zufälliger Natur zu sein. Nach Koppen ist es zweckmäßig, den Ausdruck Böen auf diejenigen zu beschränken, die folgende Eigenschaften aufweisen: Die typischen Böen („Linienböen“) sind mit Regen oder Schnee, Gewitter und Hagel verbunden, von einer plötzlichen Barometerschwankung begleitet und haben eine starke Abkühlung zur Folge. Neben diesen eigentlichen Böen gibt es zahlreiche verwandte Erscheinungen, die nur einige dieser Züge zeigen. Die böigen Winde, bei denen die einzelnen Stöße, auch wenn sie mit einem Niederschlag verbunden sind, nur als häufige Verstärkung in einem ohnehin starken Luftstrom auftreten, scheiden dabei aus. Sie haben, nach Koppen, wahrscheinlich in der noch wenig aufgeklärten Erscheinung der Turbulenz ihre Entstehungsursache. Aus der Bezeichnung Linienbö folgt schon, daß sie auf einer Linie oder einem Band gleichzeitig auftritt und sich vor allem in Wind und Temperatur scharf von dem Raum vor ihr unterscheidet. Die erste Bö, die genauer untersucht wurde, war die vom 24. März 1878, bei der das englische Schulschiff „Eurydice“ an der englischen Südküste unterging. Sie ist von Ley¹⁶⁾ bearbeitet worden. Es war

¹⁵⁾ W. Koppen, Über Böen, insbesondere die Böe vom 9. September 1913. Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie 42, 303 (1914).

¹⁶⁾ Cl. Ley. Die Eurydice-Bö. Symons' Meteorological Magazine 13, 33 (1878).

eine Linienbö, die sich auf der SW-Seite eines Tiefdruckgebiets fortbewegte. Dann ist eine andere typische Bö, eine Gewitterbö, die am 9. August 1881 ganz Norddeutschland durchzog, in klassischer Weise von Koppen¹⁾ untersucht worden. Sie begann 8 Uhr morgens an der belgischen Grenze, erreichte gegen 2 Uhr nachmittags an der Elbe und der westlichen Ostsee ihre größte Stärke und erstarb am Abend hinter der Weichsel. Sie bildete sich im SO einer tiefen Depression, deren Kern auf der Nordsee lag, in Form eines großen flachen Teiltiefs, einer Rinne niedrigen Drucks, die nicht weit in die Höhe reichte; denn schon in 1000 m über dem Boden war sie kaum noch nachzuweisen. An den Orten, über welche die Bö zog, herrschte vormittags klares, heißes Wetter mit südöstlichen bis südlichen Winden. Zuerst bildete sich Cirrostratus, dann auch Cumulus, bis am Westhorizont schwere Wolken mit außerordentlicher Schnelligkeit sich heraufwälzten, die tief nach unten hingen und dort fahlgelb oder rötlich erschienen. Große Staubmassen wurden von dem herannahenden Windstoß aufgewühlt. Es trat eine ungewöhnliche Dunkelheit ein und dann brach der erste gewaltige Windstoß aus SW los, Bäume brechend und Dächer niederreißend. Dieser Orkan dauerte 10 Minuten. Dann erst setzte Regen ein, am nördlichen Rand der Bö, in Holstein, auch schwerer Hagel in Streifen von 1 bis 12 km Breite und etwa 70 km Länge. In Holstein fielen allein 5 Millionen Kubikmeter Eis! Elektrische Entladungen fanden nur an dem hinteren Teile des Böenbandes statt, und zwar meist auch nur in wenigen Schlägen, so daß die Erscheinung nach dem gewöhnlichen Gewittermeldesystem nur schwer zu verfolgen gewesen wäre. Koppen stützt sich bei seinen Studien in erster Linie auf die Angabe von Eisenbahnern. Während auf der Vorderseite der Bö Temperaturen von über 30° herrschten, trat auf der Rückseite ein gewaltiger Temperatursturz auf 15° bis 17° ein. Die Isothermenkarte zeigt auf kurze Entfernung enorme Unterschiede. So hatte um 2 Uhr Neustadt in Holstein 26°, das kaum 40 km entfernte Segeberg dagegen nur 14°. Der schmale Zerstörungsgürtel zeigte keinerlei Spuren von Wirbelbildung. Vielmehr waren alle gestürzten Gegenstände in derselben Richtung gefallen. Aus der Beschreibung an den verschiedenen Orten geht der große Unterschied im Auftreten

¹⁷⁾ W. Koppen, Der Gewittersturm vom 9. August 1881. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie* 10, 596 u. 714 (1882).

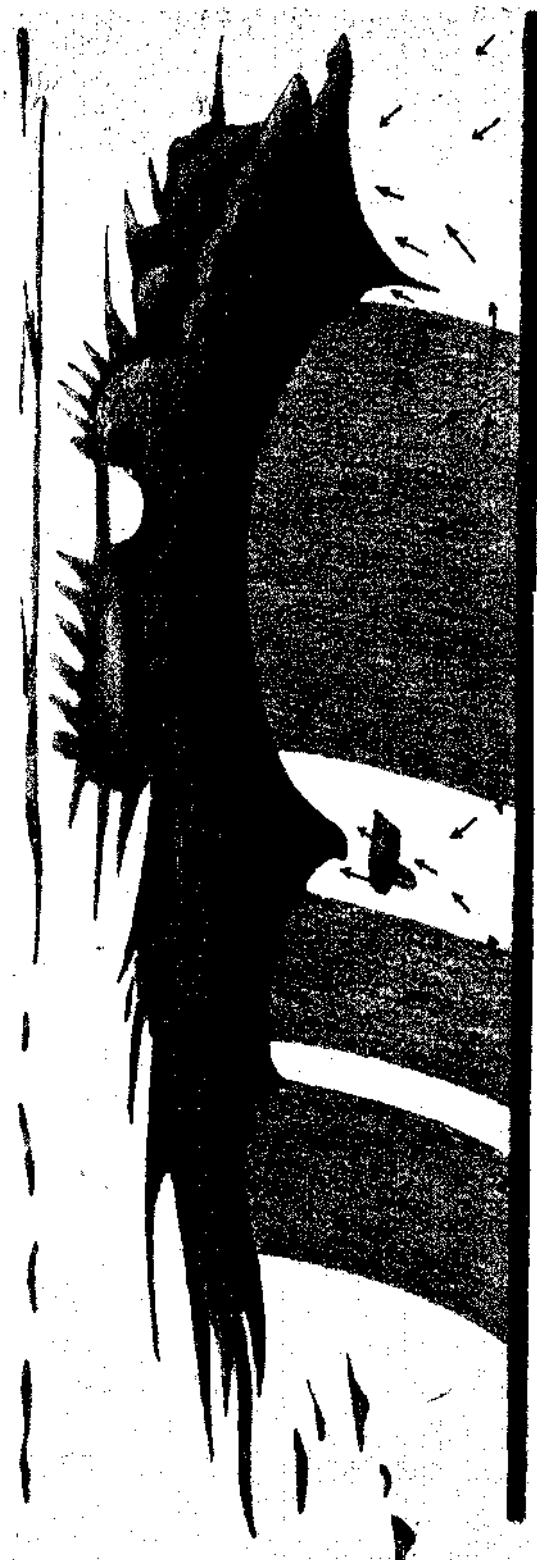


Figur 1
Herannahende Bö mit Wolkenkragen (nach Köppen)

eines und desselben Böenbandes hervor. Namentlich tritt die Hagelbildung nur an kleinen Stücken des Bandes ein, und zwar liegen diese schmalen Zerstörungstreifen annähernd quer zum Böenband.

Die Erklärung für die ungeheure Wirkung dieser Bö sieht Kopp in den großen Temperaturgegensätzen. An der Grenze der warmen und kalten Luft tritt wegen des Auftriebs der warmen Luft Abkühlung und dabei Kondensation ein. Die entstehenden Niederschläge haben wieder bedeutende Abkühlung und damit ein Senken der Luftmassen zur Folge. Auf diese Weise wird die Erscheinung nach der Seite der warmen Luft hin fortgepflanzt. Immerhin bleibt beim Senken der Luftmassen wegen der erzeugten Kompressionswärme, die wolkenauflösend wirkt, die relative Feuchtigkeit unter 100%. Deswegen ist auch bei Regen die Fernsicht stets besser als bei Nebel. Durch den heftigen Regen wird ferner dadurch ein weiteres Senken eintreten, daß die Luft von den fallenden Tropfen mechanisch mitgerissen wird. Die angrenzende warme Luft erhält dadurch erneuten Auftrieb, so daß die Kälteerzeugung gerade an der Grenze des warmen Gebiets am stärksten ist. Eine Kraft, die nicht vernachlässigt werden darf, ist die Reibung. Sie wirkt vor allem zwischen der Luft und der Erdoberfläche, wodurch Erscheinungen auftreten können, wie bei der Brandung der Meereswellen; ferner auch an der Grenze zwischen warmen und kalten Luftschichten. Dem Brandungsvorgang will Möller¹⁸⁾ sogar ein Drittel der Böenwirkung zuschreiben, den Temperaturunterschieden zwei Drittel. Im Regen, wo der fallende Luftstrom am stärksten ist, ist keine Wolkenbildung möglich. Die Streifung des Regens, die „Regenfäden“ entstehen durch die dauernden Netzhautbilder im menschlichen Auge. Erst oberhalb des Regens, nach Kopp bei der Bö von 1881 in etwa 600 m Höhe, türmt sich die eigentliche Böenwolke auf. Außerhalb des eigentlichen Böen- und Regenraums bildet sich viel loser Nebel, der als breiter wulstiger Kragen, „Böenkragen“, den Regenraum an der Vorderseite umfaßt und den Rand der Erscheinung oft recht scharf begrenzt (Fig. 1). Dieser Kragen bringt, trotzdem er meistens aus massigen dunklen Wolkenfetzen besteht, niemals Regen. Es ist nur eine Nebenerscheinung, wie schon aus der geringen Wolkenhöhe 1 bis 2000 m hervorgeht. Sturm und Regen setzen

¹⁸⁾ M. Möller, Untersuchungen über die Lufttemperatur und die Luftbewegungen in einer Bö. Meteorol. Zeitschr. 1, 230 (1884).



Figur 2
Längsschnitt einer Bö (nach Köppen)

erst ein, wenn das dahinter folgende hellere Segment herannaht, das der Unerfahrene geneigt ist, für Aufklaren zu halten. Es ist aber nicht das Ende, sondern der Beginn des Sturms und der elektrischen Entladungen. Während der Gewittersturm gegen die Sonne fortschreitet, unterliegt er doch dem Einfluß der täglichen Periode; indem er am Morgen sich bildet, mittags am stärksten ist und abends verschwindet.

Die Fig. 2 bringt einen idealen Schnitt in der Richtung des Fortschreitens der Bö. Wie Köppen später hervorhebt, ist in der Figur die Höhe des Regens im Vergleich zur Mächtigkeit der darüber liegenden Wolke zu groß angegeben, die Wolke selbst jedoch zu klein. Die Pfeile der Figur geben die Bewegung der Luft nach Abzug der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Bö, also die Bewegung relativ zur Bö, nicht zum Erdboden. Sie sind von Köppen errechnet aus

den Kontinuitätsbedingungen der Strömung, sowie aus der Wolkenbildung. Die Kontinuitätsbedingungen verlangen, daß der Querschnitt, also in diesem Fall auch die Höhe der Strömung vor und hinter dem Bande des stürmischen Windes größer sei als in ihm selbst, daß also vor der Bö die Luft in aufsteigender, hinter ihr in absteigender Bewegung begriffen sei. Die Wolkenbildung lehrt dasselbe; denn die dicke, niedrige Masse des Böenwulstes kann nur in einem stark aufsteigenden Luftstrom bestehen, die gewölbeartige Erhebung der Untergrenze der Regenwolke in der Fig. 1 und vor allem das Aufklaren hinter der Bö deuten dagegen auf absteigende Luftbewegung hin.

Möller¹⁸⁾ hat einige Jahre später die Koppensehen Gedanken weiter entwickelt, aber wohl in einer Richtung, die sich durch spätere genauere Untersuchungen als nicht vorteilhaft erwiesen hat. Möller setzt die Luftbewegung am Erdboden in Beziehung zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der ganzen Erscheinung. Es sind dann drei Fälle möglich: 1. Beide Geschwindigkeiten sind gleich, dann geschieht nichts Besonderes. 2. Die Erscheinung pflanzt sich schneller fort als die Luftbewegung in geringer Höhe über dem Boden und 3., das ist der wichtigste Fall: Die Windgeschwindigkeit in der Bö ist größer als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Dann muß der Böensturm schräg abwärts fallen, er wird durch die Reibung gebremst und durch nachdringende kalte Luft wieder emporgehoben, dabei aber von der HAUPTerscheinung überholt, so daß auf diese Weise die Luft an ihren Ausgangspunkt zurückgelangt und nun aufs neue den Sturm speisen kann. Möller gelangt so zu einem Kreislauf der Luft, der ganze Vorgang ähnelt nach ihm einer Kältemaschine. Im einzelnen spielt die Bö sich folgendermaßen ab: An der Grenze der warmen und kalten Luft steigt die warme Luft auf, bildet Wolken und Regen. Unter diesem Gewölk sinkt sie wieder ab. Am Boden muß die Luft ausweichen und läuft sich dort tot, weil sie außerhalb des Bereichs der treibenden Kraft gerät. Von hinten füllt herabsteigende kalte Luft den Raum aus, trifft auf die vorn vorhandene schon abgekühlte Luft und wirft sie erneut aufwärts, bis sie wieder sinken muß usw. Im Böenkragen reißt die aufsteigende Luft etwa sich bildende Tropfen mit in die Höhe, die dann hinten oft in Form von Wolkenbrüchen zur Erde gelangen. Wir haben also stets heftigen Beginn des Regens und langsames Aufhören. Vor allem bei

¹⁸⁾ Siehe Seite 22.

der Jügelbüdung wirkt nach Möller die Bö infolge des mechanischen Emporhebens schon kalter Luft wie eine richtige Kältemaschine. Der große Einfluß des Geländes dabei erklärt sich leicht dadurch, daß an Stellen, wie z. B. in einer Waldlichtung, wo der Wind geschwächt ist, die Wirkung vermindert wird. Aus demselben Grunde wirkt die Bö wenig an den Berghängen, dagegen sehr stark in den Seitentälern.

Bei der Bearbeitung einer der von 1881 ähnlichen Bö, die ebenfalls einem der Wirkung der Hauptluftströmung entzogenen Teiltief ihre Entstehung verdankte, verglich Aßmann¹⁹⁾ die Böenwolke mit einer Walze, die über das Land rollt; entsprechend der kurz vorher von Köppen^{10*)} eingeführten Vorstellung, daß sich in einer Bö die Luftmassen um eine horizontale Achse drehen. Aßmann erklärt das bei der von ihm bearbeiteten Bö durch Herabstürzen kalter westlicher Luft, welche die warme südöstliche Unterströmung auf den Rücken nimmt. Im Zentrum dieser Bö hatte der Windstoß, der Schornsteine umwarf und Dächer abhob, nur eine Dauer von 4 Minuten. .

Durch die Arbeiten von Ley und Köppen waren die Tatsachen über die Natur der Böen aufgedeckt worden. Untersuchungen über die Fortpflanzung der Gewitter in Italien und Süddeutschland, welche die älteren Untersuchungen darüber fortsetzten und vertieften, bewiesen, daß auch die größeren Gewitter dieselben Züge aufwiesen. Wie Köppen¹⁵⁾ 1914 hervorhebt, sind also Frontgewitter und Böen nur wenig verschiedene Formen desselben Vorgangs. Die elektrischen Entladungen sind dabei nur Begleiterscheinungen. Eine Einwirkung von ihnen auf den großen mechanischen Vorgang ist nirgends nachweisbar. Schon damals wurde als das Wesentlichste dieses Vorgangs der einmalige Einbruch kalter Luft erkannt. Nun verlaufen allerdings viele Böen nicht so einfach. Nachts zeigen beispielsweise Böen, die eine starke Druckschwankung aufweisen, oft am Boden keine Temperaturänderung. Ein Teil des Vorgangs muß sich dann in der Höhe abspielen über der schwereren, erkalteten Luft des Erdbodens.

Einige Jahrzehnte war dann kaum ein Fortschritt in der Böen-

¹⁰⁾ U. Aßmann* Zur Mechanik des Gewitters und des Gewitteistunns vom 7. August 1898 bei Köln a. Rh. Das Wetter 15» 193 (1898).

^{19A)} W. Köppen, Die Windhose vom 5. Juli 1890 bei Oldenburg und die Gevritterböe vom 10. Juli 1896 in Ostholstein. Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie 24, 445, 493 u. 546 (1896).

¹⁵⁾ Siehe Seite 19.

forschung zu verzeichnen, bis W. Schmidt in sehr anschaulicher Weise das Wesen der typischen Bö durch Versuche erläuterte. Registrierungen eines genauen Luftdruckvariographen zeigten in Wien vor lokalen Wärmegewittern immer Wellen, d. h. also eine stabile Schichtung **der** Atmosphäre an, ganz im Widerspruch zu der alten v. Bezoldschen Anschauung, daß dieses Gleichgewicht labil sein sollte. Die Erklärung ist nach Schmidt²⁰⁾ aber einfach.. Die stabile Lagerung ist nicht überall; es bildet sich vielmehr an irgend einer Stelle durch Temperaturunterschiede in der Horizontalen (nicht Vertikalen!) ein labiler Zustand. Diese Temperaturunterschiede wirken vor allem dadurch, daß sie den Luftmassen verschiedene spezifische Gewichte erteilen. An der wärmeren Stelle bildet sich ein vertikaler Luftstrom, der sich adiabatisch abkühlt und Wolken- und Regenbildung zur Folge hat. Erst jetzt wird auch die unterste Luftschicht durch die Niederschläge abgekühlt und daher seitlich unter die wärmere strömen, wodurch diese wieder in die Höhe gehoben wird, oft über die stabile Schichtung hinaus, so daß das Gewitter sich dann fortpflanzen muß. Das Charakteristische für Böen und Gewitter ist also das Fortrücken einer kalten Luftmasse. Auch Prohaska hatte übrigens schon das Auslösen und Fortschreiten der Gewitter über die Gebirgskämme durch das Hinwegtragen eines „Tropfens“ kalter Luft erklärt.

Unsere Kenntnis über die Luftbewegung am Kopfe der Gewitter ist recht gering. Das einzige Material rührt von Ballonfahrern her, die unfreiwillig dem aufziehenden Gewitter entgegengetrieben wurden. Deswegen hat Schmidt²¹⁾ durch Laboratoriumsversuche einen Einbruch kalter Luft, die sich unter wärmere schiebt, nachgebildet. Er ließ in einen Trog eine schwerere Flüssigkeit, eine gefärbte Salz- oder Glycerinlösung, in eine leichtere, Wasser, fließen. Ferner machte er Versuche mit Tabakrauch in Luft, die ähnliche Bilder lieferten. Es zeigte sich nun stets, daß die einfließende schwerere Flüssigkeit an ihrer Spitze einen mehr oder weniger ausgeprägten Kopf bildet, während rund um diesen Kopf herum eine kreisende Bewegung erfolgt.

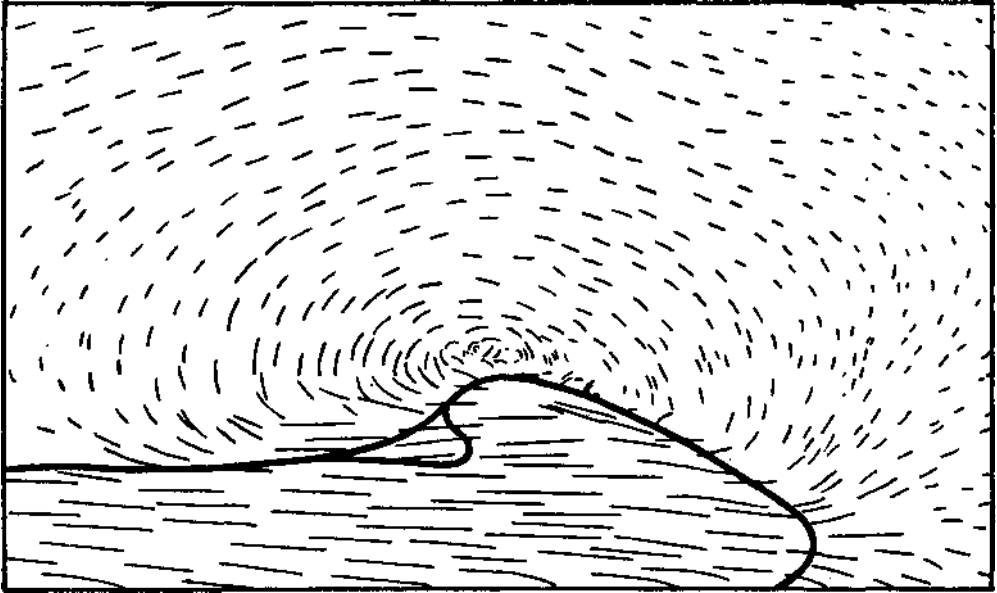
Die Figur 3 ist eine Abbildung einer photographischen Aufnahme während zweier Sekunden, wobei zur Sichtbarmachung der Strömungs-

²⁰⁾ W. Schmidt, Gewitter, Böen, rasche Druckanstiege. Wiener Sitzungsberichte IIa, **119, 1101** (1910).

²¹⁾ W. Schmidt, Zur Mechanik der Böen. Meteorol. Zeitschr. 28,355 (1911). - Weitere Bemerkungen zum Böenvorgang. Meteorol. Zeitschr. **29, 103** (1912).

linien dem Wasser Sägespäne beigemischt waren. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist der Länge der suspendierten Späne proportional. Diese „Strömungslinien“ stellen nicht die wirklichen Bahnen der Flüssigkeitsteilchen dar, sondern nur die augenblickliche Bewegungsrichtung der Flüssigkeit.

Das stärkste Ansteigen tritt über dem ersten Drittel des Kopfes ein. Hinter dem Kopf geht die Bewegung allmählich in eine Rückwärts-



Figur 3

Böenversuch von W. Schmidt

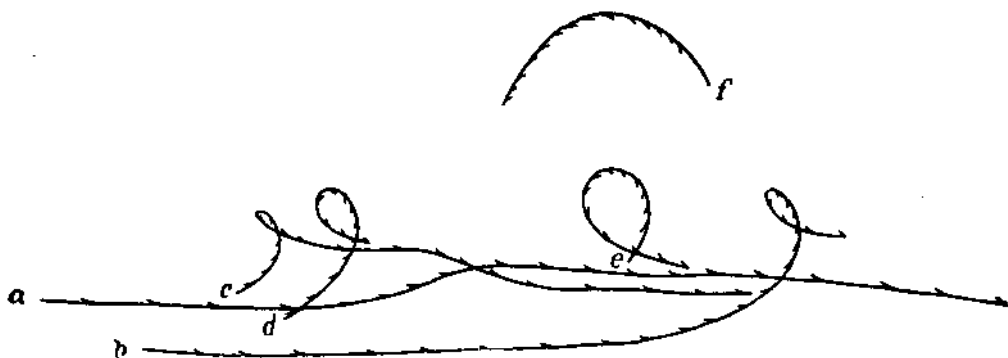
Temperaturdifferenz der kalten und warmen Flüssigkeit 7°

und dann Abwärtsbewegung über. Die größte Geschwindigkeit herrscht in dem nachrückenden Teil der schweren Flüssigkeit, und zwar ist sie etwas nach abwärts gerichtet. Der Kopf ist also nicht allein eine Stauerscheinung, sondern zugleich eine Angriffsform. In seiner Arbeit von 1914 entwirft Koppen¹⁵⁾ für den Fall, daß die Geschwindigkeit, mit der die Bö fortschreitet, die Hälfte von der größten Windgeschwindigkeit in ihr beträgt, die wirkliche Bewegung einiger Luftteilchen auf Grund der Schmidtschen Fig. 3. a und b der Fig. 4 sind Teile der kalten, e und f der warmen Luftmasse. Es finden aber auch Mischungen statt, wie die Kurve d an einem aus dem Kopf heraustretenden kalten und

¹⁵⁾ Siehe Seite 19.

c an einem in ihn hineingerissenen warmen Teilchen veranschaulicht. Beide Figuren 3 und 4 zeigen also, weil 3 mit fester Kammer aufgenommen ist, die Bewegungen relativ zum Boden. Wesentlich anders würde das Bild werden, wenn die Kammer mit der Erscheinung fortschreiten würde.

Schmidt zieht aus seinen Laboratoriumsversuchen folgende Anwendungen für den Böenvorgang. Aus dem Verlauf der Fig. 3 geht unmittelbar hervor, daß die Vorstellung der Bö als eines Wirbels mit horizontaler Achse unberechtigt ist, denn die kreisende Bewegung wird nicht durch die einbrechende schwerere, sondern durch die vorher ruhende Flüssigkeit bzw. Luftmasse verursacht. Ferner pflanzt sich der Wirbel



Figur 4

Wirkliche Bewegung einiger Luftteilchen der Figur 3 (nach Köppen)

nur als Bewegungszustand fort, indem er stets dem unter ihm befindlichen Kopf folgt. Die Luftteilchen selbst weichen nur aus. Die aufsteigende Bewegung ist im Höchstfall etwa $\frac{1}{7}$ der Geschwindigkeit der einströmenden schweren Luft. Auch die durch adiabatische Abkühlung entstehende Böenwolke zieht nicht etwa mit der Bö mit, sondern bildet sich schnell immer neu am vorderen Rande. Hat der Böenkopf den Beobachtungsort überschritten, dann tritt infolge der Abwärtsströmung und der dabei auftretenden adiabatischen Erwärmung Auflösung der Wolken ein. Der Sturm herrscht an der vorderen Unterseite des Kopfes; er wird durch die Reibung am Boden geschwächt, oben nimmt seine Stärke langsamer ab. Da nach Helmholtz an der Grenzschicht zweier Medien in einem Fall wie bei den Schmidtsehen Versuchen die Höhe der Erscheinung mit dem Quadrate der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v wächst, so wird die Kopfhöhe h

$$h = k \cdot v^2 + a.$$

a ist eine nebensächliche, die Reibung berücksichtigende Konstante ($= 1.6$). k ist eine Größe, die von dem Dichte- bzw. Temperaturunterschied der beiden Luftmassen abhängig ist. Für 7° Temperaturdifferenz, also im Falle der Fig. 3, ist nach den Schmidtschen Versuchen $k = 0,0588$. Für ein h von 300 m würde daraus ein v von 30 km/Std. folgen; für $h = 1000$ m wird $v = 47$, $h = 3000$ $v = 81$. Für die Koppensehe Bö von 1881, wo der Temperaturunterschied 14° betrug, würde für eine Höhe der Erscheinung von 800 m sich eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 67 km in der Stunde berechnen, während die Beobachtungen 70 ergaben. Da die Sturmstärke in der Bö nach Schmidts Versuchen mehr als das Doppelte der Fortpflanzungsgeschwindigkeit erreichen kann, so folgt daraus für die Aufstiegeschwindigkeit der Luft an der Vorderseite des Kopfes $\frac{1}{7} \times 140$, d. h. 20 km in der Stunde oder 5 bis 6 m/sec.

Bei den Schmidtschen Versuchen wurde das Hineinfließen der schweren in die leichte Flüssigkeit durch das Heraufziehen eines Schiebers bewirkt, der beide Flüssigkeiten vorher trennte. Wesentlich für das Entstehen einer Bö oder eines Gewitters ist also nicht das Übereinanderlagern von kalter Luft über warmer, also ein gänzlich labiles Gleichgewicht, sondern das Nebeneinanderlagern beider. Energiequelle ist auch hier die Schwerkraft, während die Kältemaschinentheorie von Möller die Energie entweder unstabiler Schichtung oder in der Abkühlung durch den fallenden Regen suchte. Der Luftdruck am Boden muß nach den Versuchen Schmidts zunächst eine langsame Druckerhöhung, dann beim Herannahen des vorderen Kopfendes eine plötzliche Druckerhöhung zeigen, während die Möllersche Vorstellung eine Druckerniedrigung zur Folge haben müßte. Daraus, daß die eigentlichen Strömungslinien der Luft für die meisten Teilchen bloße Bogen, höchstens Schleifen, aber nirgends geschlossene Kurven sind, folgerb Schmidt, daß von einem eigentlichen Wirbel in der Bö nicht die Rede sein kann. Die Luft spielt dabei überhaupt keine aktive Rolle, sondern vollführt eher eine erzwungene Schwingung, wobei sie die hydrodynamischen Gleichungen befolgt. Nur an der Grenzfläche der beiden Luftschichten gibt es Wirbelbeschleunigungen, also auch kleine Wirbel. Hier können daher nach Schmidt auch Tromben auftreten, deren Zufälligkeit und geringe Horizontalabmessungen sich so leicht erklären. Ihr Erscheinen stände aber zu der Existenz eines großen Wirbels mit horizontaler Achse in gar keinem Verhältnis. Der

schon von Koppén hervorgehobene Einfluß der Schwerewirkung der Niederschläge kann nach Schmidt nur bei den allerheftigsten Güssen Windgeschwindigkeiten bringen, die halbwegs mit den bei Böen gemessenen vergleichbar sind. Aber es ist wohl denkbar, daß diese Wirkung eine Verstärkung der Böengeschwindigkeiten hervorruft. Allerdings ist zu beachten, daß sich hier nicht Geschwindigkeiten addieren, sondern Energien, daß also der Zuwachs bei höheren Ausgangsgeschwindigkeiten immer weniger bemerkbar wird.

In einer späteren Arbeit beschreibt Schmidt²²⁾ einige weitere Versuche. Den Einfluß der Bodenerhebungen ahmte er durch geneigte Flächen am Boden des Troges nach. In diesem Fall wurde die Stärke des Kopfes geringer. Schmidt schließt daraus, daß zum Beispiel beim Überschreiten eines Gebirges durch ein Gewitter die Fortpflanzungsgeschwindigkeit abnehmen muß; doch kann jenseits des Gebirges ein einzelner „Tropfen“ kalter Luft neue Kerne für Gewitter bilden. Beim Übersetzen ganzer Gebirgsstöcke müssen offenbar immer ganz bedeutende Luftmassen im Spiele sein. Ferner machte Schmidt Versuche, bei denen im Trog beim Eindringen der schweren Flüssigkeit schon unter der leichteren einige Zentimeter der schwereren vorhanden waren. Dann trat der Kopf nach abwärts nicht hervor, sondern wich nach oben aus. Er erscheint dann stark gedrückt und in die Länge gezogen. Lagert also am Erdboden schon kalte Luft, so erfolgt der Einbruch in größerer Höhe. Am Boden fehlt dann der heftige Wind. Oben können sich jedoch gewaltige Haufenwolken bilden, und die Fortpflanzung ist größer, als wenn die kalte Luft am Boden nicht da wäre. In diese Klasse von Böen gehören die Gewitter, die statt von einer Abkühlung von einer Erwärmung begleitet werden. Im Winter werden auf diese Weise die Bodeninversionen fortgeschafft.

Einwände gegen die allgemeine Anwendung der Schmidtschen Versuche sind vor allem von Hann und Koppén erhoben worden. Nach Koppén¹⁶⁾ wird zweifellos durch die Fig. 3, die nicht konstruiert, sondern photographiert ist, der allgemeine Charakter der Luftbewegung in einer typischen Bö gut wiedergegeben. Um aber allgemein Böen als horizontale Einbrüche kalter Luft in warme erklären zu können, müßte man zeigen, wo die kalte Luft in diesen Fällen bleibt. Ferner

²²⁾ W. Schmidt, Weitere Versuche über den Böenvorgang und das Wegschaffen der Bodeninversionen. Meteorol. Zeitschr. 30, 441 (1913).

¹⁵⁾ Siehe Seite 19.

ist eine Mitwirkung des mit dem Windstoße gewöhnlich verbundenen Regens, sowie sonstiger atmosphärischer Vorgänge, die in den Schmidt - sehen Versuchen fehlen, nicht von der Hand zu weisen. Auch die Temperaturvorgänge sind nicht restlos erklärt. Hann hebt in Anmerkungen zu den Schmidt sehen Ausführungen von 1912²¹⁾ und 1916²³⁾ hervor, daß das Wesentliche des Gewitters nicht allein das Weiterwandern einer kalten Luftmasse ist, daß vielmehr das Fortschreiten vor allem der großen Gewitterzüge durch die Luftdruckverteilung in 2000 bis 4000 m Höhe bestimmt wird, denn die Gewitter überschreiten oft alle Alpenketten. Es gibt Gewitter, die keine Abkühlung bringen, ja es gibt welche, die von steigender Temperatur gefolgt werden. Am Ende längeren Regenwetters treten oft Gewitter ein, die den Regen beenden und die mit Schneefall im Gebirge verbunden sind. In diesem Fall bricht die Abkühlung sicher nicht von unten herein, sondern tritt zuerst in den hohen Schichten auf. In der Tiefebene ziehen die Frontgewitter oft auf Hunderte von Kilometern ungehindert fort, während sie meistens in die Gebirgstäler nicht eintreten. Kurz, die Ursachen der Entstehung und Fortpflanzung der Gewitter sind sehr mannigfaltig und können durchaus nicht von einem Punkte aus erklärt werden. Es ist ja auch bekannt, daß Böen gerade über großen Ebenen, sowie über dem Meere am häufigsten sind und sich dort am weitesten fortpflanzen. Schmidt hatte die Tatsache, daß beim Föhn der Nordalpen nie ein Gewitter auftritt, für eine Bestätigung seiner Ansicht gehalten, daß vor einem Gewitter eine stabile, oder wie er sagt, metastabile, jedenfalls keine labile Lagerung der Luftschichten besteht. Hann sagt demgegenüber, daß bei Föhn selbstverständlich kein Gewitter zu erwarten ist. Wie soll in einem stark absteigenden Luftstrom mit zunehmender Trockenheit sich ein Gewitter bilden? Die Gewitterregen vom 9. und 10. Juli 1916, die Schmidt²³⁾ als wahre Schulbeispiele für Böen deutet, hält Hann für „Tropengewitter“, wie sie im Buche stehen, vor allem deswegen, weil sie keinerlei Abkühlung brachten. Offenbar waren diese Gewitter verursacht durch einen lokalen kleineren Wirbel, der nur die Temperaturunterschiede in der Vertikalen ausglich, also nicht durch ein seitliches Hereinbrechen kälterer Luftmassen. Die Abkühlung kam in diesem

²¹⁾ Siehe Seite 26.

²³⁾ W. Schmidt, Der Gewitterregen vom 9. und 10. Juli 1916 in Wien. Meteorol. Zeitschr. 88, 422 u. 539 (1916).

Fall nur von oben mit den Kondensationsprodukten der aufsteigenden Luftbewegung und von der Verdunstung des Niederschlags. In seiner Erwiderung darauf betont Schmidt, daß Böen und Tropengewitter dasselbe seien, sofern man nur den Begriff Bö allgemein faßt, etwa als „horizontale Gleichgewichtsstörung im Schwerfeld“, wobei verschieden dichte, also auch verschieden warme Luftmassen, die nebeneinander vorkommen, einen ganz bestimmten Ausgleich einleiten. Demgegenüber hebt Hann hervor, daß ein Tropengewitter ein Wärmegewitter ist, bei dem die örtliche Auslösung einer Gleichgewichtsstörung in vertikaler Richtung bewirkt wird. Hiervon könnten ja diejenigen Gewitter unterschieden werden, die bei allgemeinen Gleichgewichtsstörungen der Atmosphäre auftreten, meist am Rande der in ihrem Gefolge einbrechenden kälteren Luftmassen, obgleich auch hier meistens eine Gleichgewichtsstörung in vertikaler Richtung im Spiele ist, „Böen“ im engeren Sinne, wie sie vor allem Koppert untersucht hat. Man könnte also unterscheiden zwischen Böengewittern und Gewitterböen. Die Böengewitter fehlen in den Tropen, Gewitterböen treten überall im Gefolge von Gewittern und auch sonst auf beim Einbrechen kalter Luft. Es kommen aber, wenn auch selten, warme Böen vor.

Wegener²⁴⁾ nimmt im Gegensatz zu Schmidt an, daß die Gewitterbö im wesentlichen durch den fallenden Regen und Hagel verursacht wird, der die Luft mit sich fortreißt, so daß sie dicht über dem Boden nach vorn entweichen muß. Köppens klare Ausführungen darüber sind nach Wegener durchaus zwingend. Die so eingeleitete Drehung wird weiter fortgesetzt; die heftig nach vorn strömende Luft steigt wieder auf, so daß dicht vor ihr die bekannte Stille vor dem Sturm herrscht, und kehrt in einer Höhe von 1000 bis 2000 m zur Wolke zurück. Auf diese Weise entsteht ein ausgedehnter Wirbel mit horizontaler Achse» dessen oberer Teil durch kondensierte Wolken als Böenwulst oder -kragen sichtbar wird.

Die Schmidtsehen Versuche haben bei einer Reihe von Gewitterarbeiten anregend gewirkt. So prüfte Weickmann²⁵⁾ die experimentellen Resultate an einer Gewitterbö, die am 11. Mai 1910 nachmittags im nördlichen Bayern auftrat. Aus den Aufzeichnungen

²⁴⁾ A. Wegener, Über den Ursprung der Tromben. Meteorol. Zeitschr. 28, 201 (1911).

²⁵⁾ L. Weickmann, Das Gewitter vom 11. Mai 1910. Deutsches Meteorol. Jahrbuch für 1911. Bayern I. 1-23.

von Nürnberg geht hervor, daß beim Einbruch der Bö ein Temperatursturz von 22° auf 10° , sowie eine Druckstufe von 0,8 mm eingetreten ist, der beim vollständigen Durchbruch weitere 2 mm folgten. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit betrug über Nürnberg 55 km in der Stunde, also etwas über 15 m/sec. Für 12° Temperaturunterschied folgt aus Schmidts Versuchen ein k von 5,7, bezogen auf Meter. Nach der von Koppen 1882 ausgeführten Rechnung folgt aus einem Druckunterschied 2,8 mm und den beiden Temperaturen 22° und 10° eine Höhe der Erscheinung von 720 m, was zufällig gleichzeitig die Höhe des Kondensationsniveaus war. Die Schmidtsehe Formel

$$h = kv^2$$

ergibt, wenn die oben gefundenen Werte für k und v eingesetzt werden, für h genau denselben Wert 720 m. Weickmann erhält also eine außerordentlich gute Übereinstimmung der experimentell im Laboratorium gefundenen Werte mit den Beobachtungstatsachen. Auch die Beobachtungen einiger anderer Stationen vom 11. Mai stimmen gut damit überein. Weickmann faßt seine Ergebnisse folgendermaßen zusammen: Die Gewitter vom 11. Mai 1910 sind ein neues instruktives Beispiel für die Entstehung von Gewittern im Grenzgebiet von kalten und warmen Luftströmungen. Die Energiequelle ist die Temperaturdifferenz der Luftschichten. Alle Erscheinungen lassen sich mit dem Einbrechen kalter Luft unter die warme Strömung erklären. Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gelten feste Gesetze, die mit dem Temperaturunterschied der aufeinandertreffenden Luftmassen gegeben sind. Langbeck²⁶⁾ weist darauf hin, daß sich die Verhältnisse in der Atmosphäre doch verwickelter gestalten als bei den Schmidtschen Versuchen, namentlich bei ausgesprochener zyklonaler Wetterlage, wo die allgemeinen Luftströmungen eine wichtige Rolle spielen. Sandström²⁷⁾ hat gezeigt, daß bei Böen, „gleitenden Wirbeln“, wie er sie nennt, die Drehung der Windrichtung in der Vertikalen auf die Ausbildung und Stärke der Wirbelbewegung von großem Einfluß ist. In der gegen die Erdoberfläche geneigten Gleitfläche, der Trennungsfläche des warmen und kalten Gebiets, wirken

²⁶⁾ K. Langbeck, Die Sturmverheerungen an der preußisch-sächsischen Grenze vom 12. Mai 1912. Bericht über die Tätigkeit des Kgl. Preuß. Meteorologischen Instituts im Jahre 1912, S. (102).

²⁷⁾ J. W. Sandström, Über die Wirbelbewegungen in der Atmosphäre. Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik (Stockholm) 7, 11 (1912).

auch vertikal abwärts gerichtete Komponenten der Luftbewegung mit, die erst das Emporsteigen der warmen Luftmassen ermöglichen. Diese Vertikalbewegung wird nur selten sich als Fallbö bemerkbar machen, sie wird aber auf den Luftdruck am Erdboden wirken. Die Sturmschäden der Bö am Boden sind nur als Begleiterscheinungen aufzufassen an der unteren, Widerstand leistenden Grenze der Luftmassen. Beider Bearbeitung einer Gewitterbö fand Schmauß²⁸⁾, daß an der Stirnseite dieser Bö doch ein wirbelartiger Zustand geherrscht hat, also eine Abweichung von den Schmidtschen Versuchen. Ein besonders wuchtiger Kälteeinbruch scheint die Ursache hierfür gewesen zu sein.

Koppen¹⁵⁾ zeigte, daß innerhalb des Böenbandes häufig einzelne Stellen weit stärker sind als alle anderen. Die Orte mit Sturmschäden ordnen sich daher oft in Linien an, die rechtwinklig zum Böenband in Richtung seines Fortschreitens liegen. Noch auffälliger ist das bei Hagelschlägen, von denen die Mehrzahl mit Böen zusammenhängt, die in dem größten Teil ihrer Bahn nur Wind und Regen bringen.

Tromben. Ähnlich zufällig können sich die Tromben, die Wind- und Wasserhosen, im Verlaufe einer Bö bilden. Die Tromben sind eine noch rätselhaftere Erscheinung wie die Böen. Ihre Ausdehnung ist nach Koppen oft so gering, daß in Steinwurfweite vom verderblichen Windstoß sich kein Blatt rührt. Dabei scheinen sie nicht einmal so sehr selten zu sein, wie man früher annahm. Wenigstens sind in den letzten Jahren eine ganze Anzahl von Tromben, vor allem im nordwestdeutschen Küstengebiet, sowie im Baltenland beobachtet und untersucht worden. Köppen^{19a)} ist zu einer scharf formulierten, grundsätzlichen Trennung von Bö und Trombe gekommen. Danach liegt das Wesen der Windhose in einem Wirbel, der sich um eine vertikale Achse dreht im Gegensatz zur horizontalen bei der Bö. Auch die Tromben können wie die Böen von Gewittererscheinungen begleitet sein. Wegener²⁴⁾ glaubt, daß die Tromben zur Erde herabgesenkte Enden des Böenwirbels sind. Es bildet sich bisweilen um die etwa

²⁸⁾ A. Schmauß, Die Mechanik der Gewitterbö vom 14./15. März 1914. Deutsches Meteorol. Jahrbuch, Bayern 1914. Anhang.

¹⁶⁾ Siehe Seite 19.

^{19a)} Siehe Seite 25.

²⁴⁾ Siehe Seite 32.

in 1000 m Höhe liegende horizontale Achse des Böenwirbels herum ein echter Wirbelfaden, dessen Achse entweder wie bei den Rauchringen in sich selbst zurückläuft oder sich beiderseits an die Erde heften muß. Die Luft in den Tromben besitzt, wie die Beobachtungen zeigen, keine nennenswerte aufsteigende Bewegung. Die Tromben entstehen nie an dem Orte, an dem sie beobachtet werden. Es ist also wahrscheinlich, daß sie die Verlängerung von Wirbelfäden in den Wolken sind. Am häufigsten müssen sie sich an den Flanken von Gewittern bilden, z. B. am Rande des Hagelsturzes. Die oft beobachteten Seitensprünge der Tromben erklären sich durch Verkürzung oder Verlängerung des Wirbelfadens in der Wolke, das Verschwinden durch das Zurückgehen des Fadens in die Wolke.

Außer den Wärme- und den Front gewittern führt Hann*) noch eine dritte Art von Gewittern an, die Gewitter in den Grenzgebieten zwischen kalten und warmen Räumen. Dabei unterscheidet Hann zweierlei Art von Temperaturunterschieden, solche, die nebeneinander auftreten, vor allem in der Richtung Westen—Osten, und solche, die übereinander bestehen infolge Überlagerung kalter und warmer Luftschichten. Der erste Fall wird wohl meistens zu den Frontgewittern zu zählen sein. Dagegen stellt der zweite Fall eine anders geartete Luftverteilung dar. Es kann beispielsweise unten kalte, W- bis NW-Strömung, oben warme S- bis SW-Strömung herrschen. Das Gleichgewicht ist also sehr stabil. An der Begrenzungsfläche der beiden Luftmassen bilden sich die Gewitterwolken. Diese Gewitter sind dadurch gekennzeichnet, daß sie nur schwach zur Wirkung kommen, weil sie sich nach unten wegen der kalten, ruhigen Luft nicht als Böen und Stürme bemerkbar machen können. Natürlich können sie auch keine Abkühlung bringen, sondern eher eine Erwärmung. Diese Gewitter sind außer am nördlichen Alpenfuße am häufigsten in England, wo sie in letzter Zeit mehrfach Gegenstand von Untersuchungen gewesen sind. Cave²⁹⁾, der die Wintergewitter der Jahre 1915 bis 1920 bearbeitet hat, gibt vier Ursachen für Unstabilität und daher für Gewitterbildung an: 1. Infolge Erhitzung des Erdbodens durch die Sonne, vor allem im Sommer, aber mitbestimmend auch in

*) J. Hann, Lehrbuch der Meteorologie, 3. Aufl. 1915, S. 697.

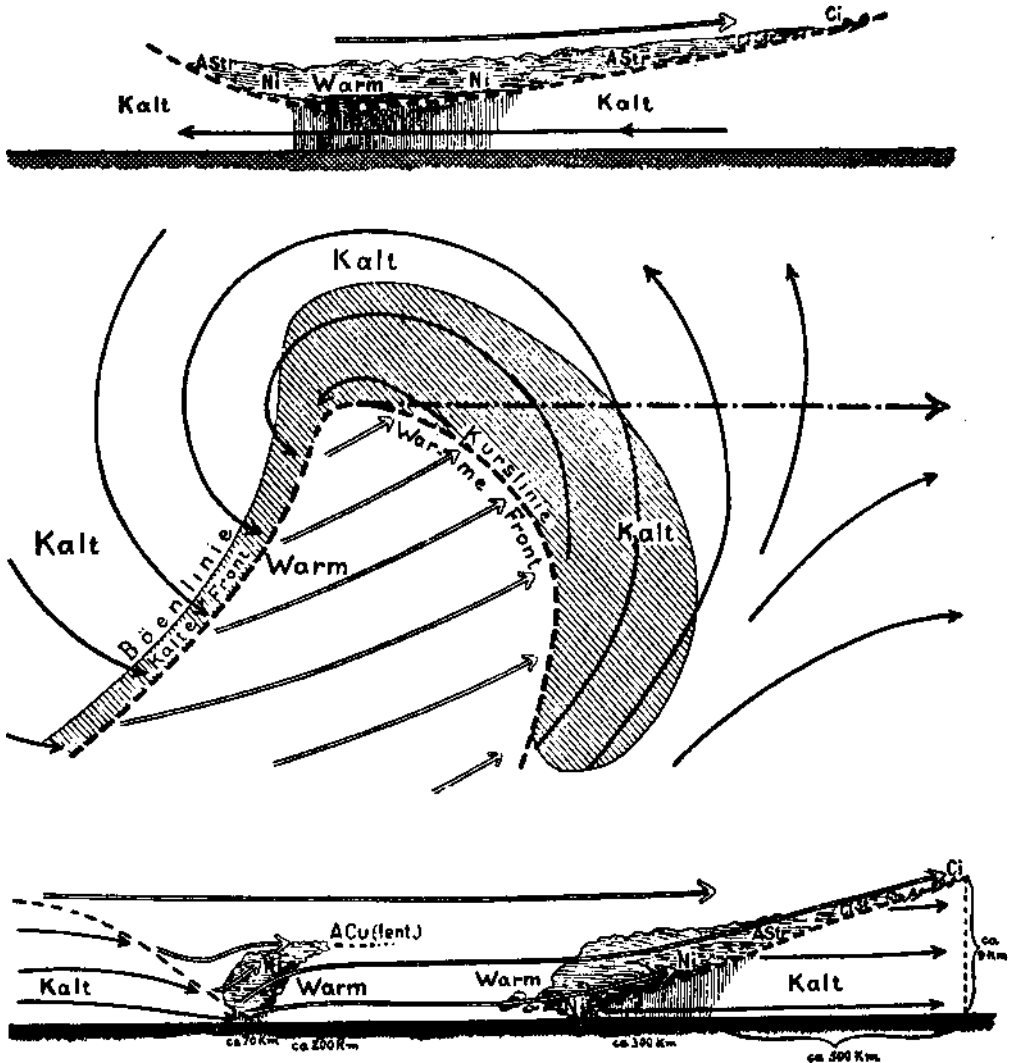
²⁹⁾ C. J. P. Cave, Wintergewitter auf den britischen Inseln. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (London) 39, 43 (1923).

anderen Jahreszeiten, z. B. bei den Aprilschauern. 2. Infolge Fließens kalter Luft in mittleren Schichten über ein warmes Gebiet, das sich oben abkühlt. Hierzu zählen in England die Sommergewitter, die nach warmen Tagen eintreten, auch die Nachtgewitter. Alto-cumuli castellati künden häufig eine solche Luft Verteilung an. 3. Infolge Emporsteigens warmer Luft über kältere Strömung. Das tritt meistens ein im NO-Quadranten eines Tiefdruckgebiets. Unten herrscht O-Wind, oben SW-Wind. Heftiger, langer Regen mit stundenlangem Gewitter ist die Folge. Dieser Fall ist aber nach den obigen Ausführungen Hanns keine Unstabilität, sondern identisch mit den Hannschen „Gewittern in den Grenzgebieten zwischen kalten und warmen Räumen“. 4. Infolge Unterpflügens warmer Luft durch einen kalten Luftstrom. Das tritt bei den meisten Wintergewittern ein. Auch dieser Fall ist wohl nicht als unstabil zu bezeichnen. Er ist im wesentlichen identisch mit den Frontgewittern.

c) Anwendung der Bjerknesschen Anschauungen auf die Gewitter. Man sieht, wie Cave alle Gewitter zu erklären versucht durch das Neben- oder Übereinander zweier Luftmassen von verschiedener Temperatur. Diese Betrachtungsweise ist vor allem durch V. Bjerknes und seine Mitarbeiter in den Vordergrund gerückt worden. Dadurch hat die thermodynamische Auffassung der Regen- und Gewitterbildung eine neue Beleuchtung erhalten, und es ist sicher, daß hier in naher Zukunft noch weitere Fortschritte zu erwarten sind. Das veränderliche Wetter in unserem Klima rührt her von dem Kampfe der kalten, polaren Luftmassen mit warmen, äquatorialen⁸⁰⁾. Die Grenzfläche, „Diskontinuitätsfläche“, bzw. die Übergangsschicht zwischen diesen beiden verschieden temperierten und daher verschieden dichten Luftmassen liegt vielfach gerade über unseren Gegenden. Der Schnitt der Grenzfläche mit der Erdoberfläche liefert eine Grenzlinie, „Polarfront“ genannt, die sich durch starke Häufung der Isothermen bemerkbar macht. Diese Polarfront ist nach Zeit und Ort raschen Veränderungen unterworfen. Sie ist daher fast nie geradlinig, sondern gekrümmt und eingebuchtet, was bei der Fortpflanzung der Front zur Bildung der Tief- und Hochdruckgebiete führt. Die Tiefdruckgebiete (Zyklonen) treten familienweise auf, d. h. es ziehen erst eine

⁸⁰⁾ Siehe das Referat von H. Ficker: Polarfront, Aufbau, Entstehung und Lebensgeschichte der Cyclonen. Meteorol. Zeitschr. 40, 69 (1923).

Reihe, meist vier solcher Gebilde vorüber, bis ein neuer Durchbruch polarer Luftmassen weit nach Süden einsetzt. Nach Bjerknes kann jede Zyklone angenähert durch folgendes Schema dargestellt werden:



Figur 5
Schema einer Zyklone (nach Bjerknes).

Zwei Grenzlinien, beide der Polarfront angehörig, trennen den warmen Sektor der Zyklone von den kälteren Luftmassen. Die östlicher gelegene wird als „warme“, die westlicher gelegene als „kalte Front“ bezeichnet (siehe Mitte der Fig. 5). Ein Querschnitt durch die Zyklone südlich ihres Zentrums (s. Fig. 5 unten) zeigt zwei kalte durch den

warmen Sektor voneinander getrennte Luftmassen, von denen die östliche, auf der Vorderseite der Zyklone gelegene, abzieht, während die westliche, auf der Rückseite, heranzieht. Nördlich vom Zentrum der Zyklone reicht die warme Luft nicht mehr bis zum Erdboden (s. Fig. 5 oben). Wichtig ist nun, daß zwei scharf voneinander getrennte Niederschlagsgebiete vorhanden sind (in der Fig. 5 Mitte schraffiert). Die stärksten Niederschläge treten ein an der warmen Front, und zwar kommen sie hier zustande durch das starke Aufsteigen der warmen Luftmasse. Ein schmaleres Niederschlagsband liegt längs der kalten Front, wo es durch das Vordringen der kalten Luft in die warme entsteht.

Die Niederschlagsbildung wird am ausführlichsten untersucht in einer Arbeit von J. Bjerknes (Sohn) und Solberg³¹). Die Hauptursache für die Regenbildung ist die adiabatische Abkühlung aufsteigender Luft. Diese kann durch drei Vorgänge ausgelöst werden:

1. Beim orographischen Regen durch das Aufsteigen der Luft am Gebirge. Eigentlich wirksam sind aber nur Erhebungen über 1000 m. In Norwegen tritt das vor allem bei westlichen bis nordwestlichen Strömungslinien der Luft ein. Dieser Regen ist meistens nicht stark, weil es in der Regel stabile, ausweichende Luftmassen sind. Instabile Luftströmungen, in Norwegen bei kalter N-Strömung, steigen jedoch höher, bringen daher cumulo-nimbus-Bildung und ergiebige Schauer. Dagegen ist warme S-Strömung meist recht stabil und bringt daher nur Nebel.

2. Beim zyklonalen Regen. Hier ist zu unterscheiden zwischen warmer und kalter Front. Die meisten Böen und Gewitter entstehen beim

- a) Kaltfrontregen. Die kalte Luft bildet meistens einen flachen Keil, der sich in die warme Luft hineinschiebt. Der Neigungswinkel beträgt etwa $V275^0 = 13$ Minuten, ist also recht klein. Das Regenband ist deswegen so schmal, weil die warme Luft wegen der oben herrschenden ziemlich starken Westwinde nicht allzu hoch über die kalte steigen kann. Regen entsteht nur da, wo die warme Luft nicht horizontal ausweichen kann, also nur an dem Vorderkeil der kalten Luft, wo am Boden vielfach SO-Wind herrscht. An der kalten Front wird das Erscheinen der Diskontinuitätsfläche oft durch alto-cumuli lenti-

³¹) J. Bjerknes und H. Solberg, Die meteorologischen Bedingungen für die Bildung des Regens. Geofysiske Publikationer, vol. II, Nr. 3, Christiania 1921.

ularis (Linsenform, s. Fig. 5 unten) angezeigt, die auch in cirro-
oimulus oder alto-stratus übergehen können. Diese Wolken kündigen
die vorgeschobene, aufsteigende warme Luft an. Sie sind aber un-
beständig, lösen sich bald wieder auf, „schmelzen“, daher die Linsen-
form. Da große, aneinander grenzende Luftmassen sich nur langsam
durchmischen, so bleiben die Temperaturunterschiede oft tage-, ja
wochenlang bestehen. Von großer Einwirkung ist nur die Erwärmung
des Erdbodens, wodurch der kalte Keil ganz oder teilweise beseitigt
werden kann.

b) Warmfrontregen. Dieser Regen tritt am deutlichsten im
Winter auf mit großen Regenbändern, die sich quer durch ganz Nord-
und Mitteleuropa erstrecken können. Es ist der typische Landregen.
Die große Ausbreitung erklärt sich daraus, daß die warme Luft un-
gehindert über die kalte steigen kann. Bei einem immer noch kleinen
Neigungswinkel der Diskontinuitätsfläche von $1/100^0 = 36$ Minuten
ergibt sich ein Regen, der bei 4 km Höhe eine Erstreckung von 400 km
hat. Im Sommer werden wieder die Grenzen zwischen warmer und
kalter Luft in den untersten Schichten leicht undeutlich, oben bleiben
sie aber bestehen. Meistens sind die Zyklonen in Europa auch schon
in „sterbendem Zustand“; sie zeigen also nur noch Überbleibsel der
kalten und warmen Front und daher auch nicht immer die typische
Kalt- oder Warmfrontregenbildung.

3. Bei den „Instabilitätsschauern“. Hierunter verstehen
Bjerknes und Solberg örtliche Schauer, die dort auftreten, wo Luft-
massen wärmer werden als die Umgebung in derselben Ebene. Hier
ist es wieder wichtig, ob die Atmosphäre stabil oder labil geschichtet
ist. Bei labiler Schichtung steigen die Luftmassen eher und höher empor,
bis sie eine stabile Schicht erreicht haben. Wesentlich kann auch der
Feuchtigkeitsgehalt der Schichten werden. Diese beiden Faktoren,
Temperatur und Feuchtigkeit, spielen eine viel größere Rolle als die
allgemeine Luftdruckverteilung. Diese örtliche Regenbildung kann
sich bis zum heftigsten Gewitter steigern.

In der Bjerknes-Solbergsehen Einteilung sind also die
Wärmegewitter der alten Mohnschen Bezeichnungsweise im wesent-
lichen identisch mit den Instabilitätsschauern, die Frontgewitter mit
den Kaltfrontregen. Aber auch bei den Warmfrontregen kann es
unter Umständen zur Gewitterbildung kommen, seltener wohl beim
orographischen Regen.

Schon vor dem Erscheinen dieser wichtigen Regenarbeit hat Douglas³²⁾ die Temperatur und Feuchtigkeit der Luftschichten vor Gewittern im Flugzeug untersucht. Er fand, daß im Sommer 1918 in Nordost-Frankreich die Schichtung bei Gewittern stets sehr instabil war. Oft war die Temperaturabnahme mit der Höhe größer als die adiabatische für dampfgesättigte Luft. Dazwischen liegen allerdings oft stabile Schichten. Über 2700 m setzte aber meistens ein schneller Temperaturfall ein und instabile Schichtung. Je größer die Feuchtigkeit, um so größer war die Gewitterwahrscheinlichkeit. Die Cumuli wachsen in der Regel aus einer gleichmäßigen Wolkenschicht heraus, und zwar um so schneller, je größer der Temperaturabfall über dieser Schicht ist. Über den Cumulus-Köpfen fand Douglas bei seinen Flügen fast stets aufsteigende Luft, absteigende dagegen in Wolkenlücken und unter vorstoßenden Wolkenschultern. In einer späteren Arbeit von 1921 betont Douglas, daß nur dann ein Gewitter zum Ausbruch kommen kann, wenn oberhalb des Kondensationsniveaus instabile Verhältnisse vorhanden sind; denn nur dann erhält die aufsteigende Luft einen neuen starken Antrieb und kondensiert sich später rasch und stark. Dieser Gedanke ist nach Wagner sehr plausibel und gestattet vor allem eine sehr einfache Erklärung der Nachtgewitter, sowie der Gewitter auf den Meeren. Beispielsweise kann durch erzwungenes Aufsteigen konvergenter Luftströmungen unter solchen Verhältnissen oben ein Gewitter ausgelöst werden. Wagner hält aber einen bindenden Beweis dafür, wie ihn Douglas mit seinem Material von 1918 versuchte, noch nicht für erbracht. Es muß erst mit einem größeren und besseren Beobachtungsmaterial nachgeprüft werden, ob wirklich die Temperaturgradienten in der Höhe merklich die für adiabatisch aufsteigende, gesättigte Luft übertreffen. Wenn sich das bestätigen sollte, dann hätte man zugleich eine gute Erklärung dafür, warum so häufig keine Gewitter auftreten, trotzdem sonst alle Bedingungen für ihre Entstehung da zu sein scheinen. Stabile Temperaturschichtungen in größerer Höhe würden dann keine starke Kondensation zustande kommen lassen.

³²⁾ C. K. M. Douglas, Temperaturen und Feuchtigkeiten der oberen Luftschichten, Bedingungen, die günstig für die Gewitterentwicklung sind. Professional Notes of the Meteorological Office London, Nr. 8, 1920. — Gewitter in Schottland und ihre wahrscheinliche Erklärung. Journal of the Scottish Meteorological Society 18 (1921). - Referat von A. Wagner, Meteorol. Zeit sehr. 40, 30 (1923).

Erwähnt sei schließlich noch eine Arbeit von Newham³³⁾, der glaubt, daß die Unstabilität im Winter über England durch Luft hervorgerufen wird, die polaren Ursprungs ist und sich dann beim Streichen über den Atlantischen Ozean von unten erwärmt und gleichzeitig nach links abgelenkt wird. An Stelle der Sonnenwärme im Sommer tritt die Ozeanwärme im Winter. Auf den Einwand, daß sich durch diese Ursache die Böengewitter schwerlich erklären lassen, erwidert Newham, daß die Böen über England selten sind und daß daher die Mehrzahl der englischen Gewitter auf andere Art entstehen müssen.

d) Die Bestandteile der Gewitterwolken. In seiner „Thermodynamik der Atmosphäre“ sagt Wegener mit Recht: „Über den Aufbau und Mechanismus der Gewitterwolken waren vielfach und sind noch heute recht irrtümliche Anschauungen im Gange, welche hauptsächlich daher rühren dürften, daß sich für einen am Erdboden befindlichen Beobachter wesentliche Teile der Erscheinung zu verbergen pflegen. In rund 4000 m erfolgt fast regelmäßig eine seitliche Ausbreitung der Wolke, wodurch aber nun die oberen Teile verdeckt werden.“ Die Köpfe der Gewitterwolken erreichen oft recht beträchtliche Höhen. Häufig werden 10 km, in den Tropen sogar 15 km überschritten. Es ist also unmöglich, ein Gewitter zu überfliegen. Bei einem solchen Versuch wird man vielmehr mitten in das Gewitter hineingeraten. Da die 0°-Isotherme im Sommer in etwa 3000 m Höhe liegt, spielt sich der größte Teil der Vorgänge bei Temperaturen unter Null ab. Die Niederschläge bilden sich daher, wie die Beobachtungen auf hohen Bergen bestätigen, zunächst in fester Form und werden vielfach erst beim Durchfallen wärmerer Schichten schmelzen, oder wie beim Hagel durch anlagerndes unterkühltes Wasser an Größe zunehmen. Die Höhe der unteren Wolkenschichten beim Gewitter unterliegt nach Kann großen Schwankungen. Die Jahreszeit ist hier von Einfluß, im Sommer sind sie höher als im Winter. Die Wolkenhöhe steigt auch mit der Höhe des Untergrundes. Im Gebirge ist die Ansicht weit verbreitet, daß die Gewitter unterhalb der Berggipfel entlang ziehen. Das ist aber eine Täuschung, wozu vielfach die Tatsache beitragen mag, daß fast bei jedem Gewitter auch tiefe Wolkenschichten vorhanden

³³⁾ E. V. Newham, Über die Bildung von Gewittern auf den britischen Inseln im Winter. Professional Notes of the Royal Meteorological Society, London Nr. 29 (1922).

sind. Diese sind aber niemals Sitz der eigentlichen elektrischen Entladungen. In den Tropen und in den Alpen kann die untere Wolken-
grenze auf 6000 m steigen. Prohaska betont, daß fast alle Gewitter
die Bergkämme und Spitzen der Ostalpen überqueren. Sie ziehen z. B.
oft über den Großglockner. Andererseits kann bisweilen im Flachlande,
vor allem bei Schneeböen, der untere Wolkenrand die Erde berühren.

Die Messung der Höhe der Gewitterwolken erfolgt nach den
üblichen Methoden der Wolkenmessung, also am genauesten durch
gleichzeitige Aufnahme oder Photographie der Wolke von zwei Stationen
einer festen Basis aus. Walter⁹¹⁾ hat 1906 ein Verfahren zur Bestim-
mung der Wolkenhöhe, aus der der Blitz schlägt, mit Hilfe einer photo-
graphischen Kammer angegeben. Auf der Mattscheibe der Kammer
mißt man die Entfernung der Wolke vom Horizont, wartet, bis -ein
Blitz herausschlägt und bestimmt mittels einer Sekundenuhr den Zeit-
unterschied zwischen Blitz und Donner. Aus der so erhaltenen Ent-
fernung der Wolke kann man mit Hilfe der Objektivbrennweite und
der Bildhöhe auf der Mattscheibe die wirkliche Höhe der blitzenden
Wolke berechnen. Da das Wolkenbild meistens nicht sehr deutlich
ist, auch der Donner kein momentanes Geräusch ist, so erhält man
nur ungefähre Resultate, am besten bei senkrechten Blitzen und
scharfem Knall des Donners. So fand Walter in Hamburg Höhen,
die von 1300 bis 2700 m schwankten.

Der Wassergehalt der Wolken. Eine Frage von grund-
legender Bedeutung für die Vorgänge in der Wolke ist die nach dem
Wassergehalt der Wolken. Leider liegt hierüber nur sehr wenig Be-
obachtungsmaterial vor. Die Gebrüder Schlagintweit fanden in der
Mitte des vorigen Jahrhunderts am Monte Rosa 2,8 g pro Kubikmeter,
indem sie die feuchte Wolkenluft durch Chlorkalziumröhren saugten.
Doch ist dieser Wert vermutlich zu klein, weil bei dieser Methode
ein gut Teil der Nebelluft am Chlorkalzium vorbeistreicht. Conrad³⁴⁾
wandte, um den Fehler zu vermeiden, zwei Methoden an. Einmal
ließ er die Nebelmassen in einen evakuierten Glasballon stürzen und
zweitens fing er sie in einer Glasglocke auf, die soweit erwärmt war,
daß sich an der Wand nichts kondensieren kann. Dann erst wurde
bei beiden Methoden die aufgefangene Nebelluft mittelst durchsaugter

³¹⁾ Siehe Seite 83.

³⁴⁾ V. Conrad, Über den Wassergehalt der Wolken. Meteorol. Zeitschr. 16,
656 (1899).

trockener Luft in Chlorkalziumröhren gebracht. So fand Conrad auf dem Hochschneeberg-Hotel bei Wien (1800 m Höhe) und auf dem ebenso hohen Schafberge bei Salzburg in ziemlich dünnem Wolkennebel, der eine Sichtweite von 30 bis 80 Schritt hatte, unter neun Messungen den Höchstwert 4,5 g, den Tiefstwert 0,9 g/m³. Nun sind ja aber die Wolken meistens viel dichter; Conrad schätzt daher, daß in dichten Cumulus-Wolken etwa 9 g/m³ zu erwarten sind. In Laboratoriumsversuchen erhielt er bei der Wolke eines Dampfkessels sogar 22 g/m³.

Zu ähnlichen Resultaten kommt Wagner³⁵⁾, der nach derselben Methode auf dem Hohen Sonnblick (3100 m) 22 Beobachtungen ausführte. Er fand bei Temperaturen um 0° herum im Mittel 2 g flüssiges Wasser pro Kubikmeter Wolkenluft, als größten Wert 4,8 bei dichtem Nebel. Die Untersuchungen Wagners führen also zu dem Ergebnis, daß selbst in dichten Wolken der Gehalt an flüssigem Wasser meistens kleiner ist als der an gasförmigem. Selbst bei dem Wert 4,8 für flüssiges Wasser betrug der Gehalt an Wasserdampf noch 5,1 g im Kubikmeter. In der freien Atmosphäre hält Wagner den Wert 1 bis 2 g flüssiges Wasser in der Wolke für vorherrschend, weil die Kondensation an den Bergen stärker ist als in freier Atmosphäre.

Die Größe der Wolkenelemente. Die kleinen Wolkenelemente, welche der Wolke das weiße oder graue Aussehen geben, sind nicht zu verwechseln mit den Regentropfen. Sie bestehen zwar wie diese aus kleinen Wassertropfchen, die aber ganz bedeutend kleiner sind als beim Regen. Nachdem schon einige Jahre vorher Dines in England die Wolkenteilchen unter das Mikroskop gebracht hatte, maß Aßmann³⁶⁾ nach dieser Methode an einem Tage auf dem Brocken in einem ziemlich gleichmäßigen Wolkennebel 3 bis 8 X 10⁻⁴ cm Durchmesser als Größe der Wolkenelemente, Kähler³⁷⁾ nach derselben Methode auf der Schneekoppe an 7 Nebeltagen in recht verschieden dichten Wolken Schwankungen von 4 x 10⁻⁵ bis 2 X 10⁻³ cm. Nach der schon von Kämtz angewandten optischen Methode, durch Messung der

³⁵⁾ A. Wagner, Untersuchung der Wolkenelemente auf dem Hohen Sonnblick. Wiener Sitzungsberichte IIa, 117, 1287 (1908).

³⁶⁾ R. Aßmann, Mikroskopische Beobachtungen der Wolkenelemente auf dem Brocken. Meteorol. Zeitschr. 2, 41 (1885).

³⁷⁾ K. Kähler, Messung der Wolkenelemente auf der Schneekoppe. Meteorol. Zeitschr. 28, 465 (1911).

Durchmesser der im Nebel erzeugten Sonnenhöfe oder künstlicher Lichthöfe, erhielten Pernter³⁸⁾, Conrad³⁹⁾, Wagner^{TM)} und H. Köhler⁴⁰⁾ wieder gleichmäßigere Werte von 1 bis 4×10^{-3} cm. Die Größe 5×10^{-3} cm stellt nach Wegener⁴¹⁾ die Grenze dar zwischen Nebel- und Regen-tropfen. In der Tat halten sich alle bisherigen Messungen der Wolkenelementgröße unter diesem Schwellenwert. Wegener kommt auf diesen Grenzwert durch die Annahme, daß aus einer regnenden tiefen Wolke Tropfen bei einer Fallgeschwindigkeit von 0,5 m/sec fallen können. Diese Tropfen müßten, um schweben zu können, etwa die Größe des Schwellenwerts haben.

Aus den Messungen des Wassergehalts der Wolke ist es möglich, eine ungefähre Vorstellung von der Anzahl der Wolkenelemente in der Volumeneinheit zu erhalten. Nimmt man eine Größe von $2r = 2 \times 10^{-3}$ cm als Durchmesser an, so wäre das Volumen des Tröpfchens $\frac{4}{3}\pi r^3 = 4,2 r^3 = 4,2 \times 10^{-9} \text{ cm}^3$ oder g. Das ergäbe für einen Wassergehalt von 1 bis 2 g im Kubikmeter eine Anzahl von etwa 240 bis 480 Tröpfchen im Kubikzentimeter. Das ist dieselbe Größenordnung, wie sie die Messung der Anzahl der Kondensationskerne mit dem Aitkenschen Kernzähler in diesen Luftschichten ergibt.

Die Übersättigung in der Wolke. Aus der Kleinheit der Wolkenelemente erklärt es sich, daß die Tröpfchen in der Wolke schweben. Es genügt schon eine geringe aufsteigende Luftbewegung, um ihre Fallgeschwindigkeit aufzuheben. Durch die Kleinheit der Wolken-tröpfchen erklärt es sich auch, daß stets eine gewisse Übersättigung der Wolke mit Wasserdampf vorkommt. W. Thomson (Lord Kelvin) hat bereits im Jahre 1870 die Änderungen des Gleichgewichtsdampfdrucks berechnet, die für eine stark gekrümmte Flüssigkeitsoberfläche gelten. Danach ist der Sättigungsdruck auf der Oberfläche eines Tröpfchens stets größer als an einer ebenen Wasseroberfläche.

³⁸⁾ J. M. Pernter, Größe der Wolkenelemente, berechnet aus meteorologischen optischen Erscheinungen. Meteorol. Zeitschr. Hannband, 378 (1906).

³⁹⁾ V. Conrad, Bildung und Konstitution der Wolken. Meteorol. Zeitschr. 24, 159 (1907).

³⁵⁾ Siehe Seite 43.

⁴⁰⁾ Hilding Köhler, Wasser oder Eis. Über die Größe der Wolkenelemente in einigen verschiedenen Wolken. Meteorol. Zeitschr. 40, 257 (1923).

⁴¹⁾ A. Wegener, Größe der Wolkenelemente. Meteorol. Zeitschr. 27, 354 (1910).

Wenn daher die Luft bei gewöhnlicher Dampfspannung gesättigt ist, so können ganz kleine Tröpfchen nicht bestehen, sie müssen vielmehr sogleich wieder verdampfen. Je kleiner ein Tröpfchen ist, um so mehr Überdruck ist nötig, um ihn zum Verdampfen zu bringen. Damit überhaupt ganz kleine Tröpfchen bestehen können, ist eine gewisse Übersättigung der Luft nötig. Wegener⁴¹⁾ gibt in der oben schon erwähnten Arbeit eine Tabelle der Gleichgewichtstropfen für verschiedene Übersättigungen, ausgedrückt in relativer Feuchtigkeit. Einer Übersättigung von 101 % entspricht danach ein Durchmesser von etwa 2×10^{-5} , von 105% bereits 5×10^{-6} , 120% 14×10^{-7} cm. Für sehr große Übersättigungen würde sich der Durchmesser dem der Wasserdampfmoleküle 4×10^{-8} nähern. Auf sehr große Übersättigungen ist, wie man sieht, aus den bisherigen Messungen der Größe der Wolkenelemente nicht zu schließen. Sie gehen nicht viel über 101 % hinaus. Das ergibt sich nach Wegener noch aus einer anderen Überlegung. Bei einem Tropfendurchmesser von 2×10^{-5} cm müssen schon die Farben trüber Medien auftreten. Da die sichtbaren Wolkenelemente aber das gesamte weiße Licht reflektieren, müssen sie größer als 2×10^{-5} cm sein, also kann auch die Übersättigung niemals erheblich sein.

Wagner³⁵⁾ hat auf dem Sonnblick mit einigen sorgfältig kontrollierten Haarhygrometern einige direkte Messungen der Übersättigung ausgeführt. Er fand einige Male als höchsten Wert 107%.

Die Unterkühlung der Wassertropfen. Ein großer Teil der Wolken besteht oberhalb der 0°-Isotherme, also bei Temperaturen unter Null, noch aus Wassertröpfchen. Das kann bis zu sehr tiefen Temperaturen heruntergehen. So hat Wegener⁴²⁾ in Grönland einmal einen weißen Regenbogen, der nur durch Tröpfchen entstehen kann, bei — 34° beobachtet. Außer den Tröpfchen enthält die Luft bei diesen tiefen Temperaturen viel Wasserdampf, der meistens übersättigt ist. Vor allem in ganz reiner Luft kann es stark übersättigten Wasserdampf geben. Fällt er aus, so wird er meistens in fester Form, in Eisnadeln ausscheiden, die allmählich anwachsen. Unter Umständen ist aber auch eine Kondensation in Tropfenform möglich.

⁴¹⁾ Siehe Seite 44.

³⁵⁾ Siehe Seite 43.

⁴²⁾ A. Wegener, Frostübersättigung und Cirren. Meteorol. Zeitschr. 37, 9., (1921).

Die Entstehung des Graupeis und Hagels

Graupel nennt man bekanntlich die kleinen, undurchsichtig weißen Körner, die sehr häufig in Begleitung von Böen und Gewittern fallen. Die ursprünglich ausgeschiedenen Schneekristalle stoßen beim Fallen auf unterkühlte Tröpfchen, mit denen sie zu Graupeln zusammengepreßt werden. In der Tat werden die Graupeln meistens in Wolken beobachtet, deren kleine Tröpfchen unterkühlt sind. Wegener*) unterscheidet Reif graupeln und Frost graupeln, ähnlich wie wir gewohnt sind, zwischen Rauhreif und Rauhrost zu trennen. Die Reifgraupeln bestehen aus oft sehr zarten, kleinen Körnern, die beim Aufprallen in mehrere Stücke zerschellen können und daher offenbar meistens nur aus einem zusammengepreßten Kristall bestehen. Da bei der Graupelbildung schon in bezug auf Wasser Übersättigung in der Wolke vorhanden sein muß, ist die Übersättigung in bezug auf Eis sehr hoch. Einer relativen Feuchtigkeit von 100 % in bezug auf Wasser entspricht bei -10° nämlich eine relative Feuchtigkeit von 110% in bezug auf Eis, bei -20° 121 %, bei -30° sogar 134 %. In den Eiswolken (cirren) wird wahrscheinlich die Übersättigung lange nicht erreicht, so daß in ihnen schon aus dem Grunde eine Graupelbildung nicht möglich ist. Dagegen wird die Graupelbildung lebhaft sein in den oberen Teilen der Cumulus-Wolken. Die Gegenwart von Cirrus-Schirmen wird die Entstehung noch begünstigen. Die Graupeln besitzen dann, wie Wegener hervorhebt, den Tropfen gegenüber eine Überlegenheit in bezug auf Entstehung und Wachstum, während die entstehenden Tropfen bald wieder verdampfen müssen. Der Übersättigungsgrad ist also für die Entstehung der Niederschläge von großer Bedeutung. Vor allem, wenn sich die Wolke seitlich ausbreitet und keine Erneuerung der Übersättigung eintreten kann, dann wird die Graupelbildung lebhaft sein. Die ganze obere Böenwolke muß aus Graupeln bestehen, wie ja auch aus den Fallstreifen vielfach ersichtlich ist und die Beobachtungen auf hohen Bergen bestätigen.

Bei den größeren und schwereren Frostgraupeln lagern sich wahrscheinlich außer den Wolkenelementen an die kleinen Reifgraupeln auch größere Wasser tropfen, die im Augenblick der Berührung gefrieren und alles zu einem undurchsichtigen Klümpchen verkitten.

Die Bezeichnung Hagel wird vielfach schon irrtümlicherweise

*) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre. 1911, S. 288.

für diese Frostgraupeln gebraucht. Der eigentliche Hagel, oft auch „Schloßen“ genannt, fällt fast ausnahmslos bei Gewittern. Es sind meistens mehr oder weniger durchsichtige, oft recht große Eiskörner mit einem unsichtbaren (Graupel) Kern. Was im Hagelkorn aufeinanderfolgt von innen nach außen, sagt Trabert⁴³), folgt in der Wolke von oben nach unten. In den obersten, für die Hagelbildung allein in Betracht kommenden Wolkenteilen, also in Höhen über 4000 m, haben wir gleichzeitig Schneekristalle und unterkühlte Tröpfchen, in den mittleren Schichten allein unterkühlte Tropfen, in den untersten Schichten nur die kleinen Nebeltröpfchen und Temperatur über Null. Die erste Schicht liefert den Kern, die zweite die konzentrischen Hüllen, wie sie oft so schön am Hagelkorn zu sehen sind, und die dritte das Material zu den mehr oder weniger kristallinen auf dem Kern erstarrten Bildungen. Trabert hält, allerdings unter der Annahme einer Fallhöhe von 2000 m und einem Wassergehalt von 4 g/m^3 , diesen Vorgang quantitativ noch nicht für ausreichend zur Erklärung der großen Hagelbildungen. Wegener weist aber mit Recht darauf hin, daß in den Böen- und Gewitterwolken sowohl Fallhöhe als Wassergehalt viel größer sein können. Gerade in den höchsten Wolkentürmen, die 8000, ja 10000 m hoch steigen können, wird die Hagelbildung am stärksten sein. Wenn die Hagelkörner eine gewisse Größe, nach Hann im allgemeinen die von Haselnüssen, selten die von Taubeneiern, noch seltener die von Hühnereiern, nicht überschreiten, so liegt das daran, daß die Cumulonimbus-Wolken über 10 km nicht herauskommen. Zwei Umstände werden das Hagelkorn vergrößern können: einmal die aufsteigende Luftbewegung. Die Hagelwolke zeigt immer heftige, innere Bewegungen und Wirbel, durch welche die Hagelkörner wieder hochgehoben werden können. Dann wird die tiefe Temperatur, -5° bis -15° , des Hagelkorns die Kondensation an ihm in den wärmeren Schichten, durch die er fallen muß, begünstigen. Die eigentümlichen Formen, welche das Hagelkorn annehmen kann, sind Absonderlichkeiten dieses Kondensationsvorganges.

Das Hagelschießen. Sehr alt ist die Sitte des Wetterläutens. Durch den Schall sollte der Hagel und Blitz abgelenkt werden. Ebenso glaubte man, durch Schießen in eine heraufziehende Böenwolke die Wolke zur Entladung bringen zu können. Man dachte hier vor allem

⁴³) W. Trabert, Die Bildung des Hagels. Meteorol. Zeitschr. 16, 433 (1899).

an eine Wirkung der Pulvergase. Selbst nachdem das durch Laboratoriumsversuche widerlegt war, hielt man an der Wirkung des Hagelschießens fest. Versuche im großen Stil, die im Jahre 1896 in Steiermark in Gegenwart zweier führenden Meteorologen, Pernter und Trabert, ausgeführt wurden, ergaben aber ebenfalls kein Resultat. Man verwendete dabei Kanonen mit großen Trichtern, die große Rauch- oder vielmehr Luftwirbelringe erzeugten. Die Messungen zeigten aber, daß diese Ringe kaum höher als bis 300 m gelangten. Eine Einwirkung auf die Hagelbildung und -entladung mußte also so gut wie unmöglich sein.

Die Kondensationskerne. Es ist seit Coulier¹⁴⁹⁾ bekannt, daß die Kondensation in wasserdampf haltiger Luft nur dann eintritt, wenn die Luft außerdem gewisse Beimengungen enthält. Ganz reine Luft ist außerstande, Nebel zu bilden. Die Kondensation erfolgt an gewissen „Kernen“, die nach den Untersuchungen von Richarz und seiner Schüler im wesentlichen aus Spuren wässeriger nitroser Gase bestehen. Diese festen oder flüssigen Kerne dienen als Ansatzstellen für den sich niederschlagenden Wasserdampf. Sie gelangen durch die Verbrennungsprozesse stets in Unmengen in die Atmosphäre. Vielleicht spielen außerdem, worauf kürzlich H. Köhler^{14a)} wieder nachdrücklich hingewiesen hat, auch die aus den großen Wasserflächen der Erde verdunstenden Salzteilchen bei der Kernbildung eine Rolle. Aitken hat im Jahre 1888 die Eigenschaft der Kerne, als Kondensationskerne zu dienen, in sehr sinnreicher Weise dazu benutzt, um ihre Anzahl zu messen. In seinem „Staubzähler“ — nach Wigand⁴⁴⁾, besser „Kernzähler“ genannt, weil der grobe Staub dabei überhaupt keine Rolle spielt — wird ein bekanntes Luftvolumen mittels einer kleinen Pumpe plötzlich ausgedehnt, so daß es sich abkühlt und Kondensation in ihm eintritt. Die entstehenden kleinen Tröpfchen fallen zu Boden und können dort auf einem Meßfeld mittels einer Lupe gezählt werden. Mit diesem Meßinstrument stellte Aitken an Industrieorten Kernzahlen fest, die sich auf viele hunderttausend im Kubikzentimeter Luft

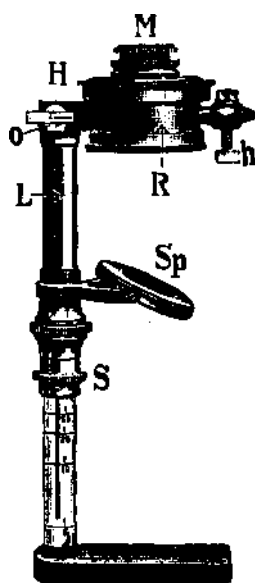
¹⁴⁹⁾ Sietie Seite 112.

^{44a)} Hilding Köhler, Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre, 1. und 2. Mitteilung. Geofyske Publikationer II, No. 1 und 6. Christiania 1921 und 1922. Eine quantische Verteilung von Materie in der Atmosphäre. Meteorol. Zeitschrift 39, 263 (1922).

⁴⁴⁾ A. Wigand, Über die Natur der Kondensationskerne. Meteorol. Zeitschr. 30, 14 (1913).

belaufen können, während in reiner Luft nur wenige Tausend, unter Umständen, so auf Bergen und dem Meere, nur wenige Hundert im Kubikzentimeter gemessen werden. Nach Wigand¹⁵⁴⁾ gibt der Kernzähler eine Expansion von 1,20, d. h. das Endvolumen beim Pumpen verhält sich zum Anfangsvolumen wie diese Zahl. Bei stärkerer Expansion treten neue Erscheinungen dadurch auf, daß jetzt auch die Kondensation an elektrischen Ladungen der Luft vor sich gehen kann. (Vgl. S. 112.)

Lenard⁴⁵⁾ hält die Kerne für Molekülkomplexe. Sie sind in allen Gasen und Dämpfen vorhanden, auch wenn diese staubfrei gemacht



Figur 6
Aitkenscher Kernzähler

R = Meßraum

Sp = Spiegel zur Einstellung der richtigen Beleuchtung im Meßfeld

o = Öffnung, welche mittels des Hahnes H die Verbindung der Außenluft im Meßraum R herstellt

h = zweiter, nebensächlicher Hahn zum Reinigen

L = Luftpumpe-Kolben

S = Schieber dieses Kolbens zum Herunterziehen

M = Lupe zum Ablesen

sind, und werden durch besondere Molekelkräfte so zusammengehalten, daß sie bei der betreffenden Temperatur unverdampfbar sind, sich also wie feste Partikelchen verhalten. Die Kerne haben, wenn sie unelektrisch sind, die Größe von nur wenigen Molekülen. Bei elektrischer Ladung werden sie durch Zusammenlagerung größer und erreichen dann einen Durchmesser von 14 bis 22 $\times 10^{-8}$ cm, sind also immer noch so klein, daß es hoffnungslos ist, sie mit einem Mikroskop im verdunstenden Tröpfchen erkennen zu wollen. Nach Lenard spricht vieles dafür, daß die Kerne Wassermoleküle sind. Ihre Bildungsweise

¹⁵⁴⁾ Siehe Seite 115.

⁴⁵⁾ P. Lenard, Probleme komplexer Moleküle III. Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Heidelberg (C. Winter) 1914.

hat man sich so vorzustellen, daß bei den durch die Wärmebewegung stattfindenden Zusammenstößen eine Zusammenlagerung der Moleküle infolge der Molekularkräfte stattfindet, besonders dann, wenn die Moleküle elektrisch sind. Bei der Kondensation des Dampfes wird die Anzahl und Größe der Kerne auf die Verdichtung von Einfluß sein.

e) Gewitterentstehung und Kolloidforschung. Eine ganz andere Betrachtungsweise als die thermodynamische ist im Jahre 1920 von Schmauß⁴⁶⁾ angeregt worden. Er geht davon aus, daß man vor allem im Wetterdienst immer wieder die Erfahrung macht, daß die dynamischen und thermodynamischen Überlegungen nicht ausreichen, um jede Wolken- und Niederschlagsbildung zu erklären. Dagegen wird man oft an chemische Vorgänge erinnert, welche die thermodynamischen wenn nicht ersetzen, so doch ergänzen können. Vor allem der neueste Zweig der Chemie, die Kolloidforschung, hat in dem Verhalten kolloidaler Lösungen Forschungsergebnisse erzielt, die auch für die Atmosphäre von Bedeutung sind. Wenn man sich erst in die Fülle von neuen Fachausdrücken hineingefunden hat, dann ist es in der Tat überraschend, wie ähnlich oft beide Vorgänge sind. Zur Einführung in die Kolloidforschung ist wohl das Lehrbuch von Zsigmondy⁴⁷⁾, von dem auch Schmauß ausgeht, am geeignetsten. Kolloid bedeutet fein verteilte Materie, etwa von der Größe zwischen der molekularen und der mikroskopischen Dimension, umfaßt also im wesentlichen die Molekülkomplexe oder die ultramikroskopischen Teile. An Stelle des häufigsten Lösungsmittels der Kolloide, des Wassers, tritt in der Atmosphäre die Luft. Wir haben es also nicht mit kolloidalen Lösungen in Wasser, „Hydrosolen“, sondern mit solchen in Luft, „Aerosolen“, zu tun. Solche Aerosole wären vor allem die Kondensationskerne, kurz gesagt der Dunst in der Atmosphäre. Die mikroskopischen Teilchen der Luft, wie die Wolkenelemente, wären sogenannte „Suspensionen“ des Lösungsmittels Luft. Genau wie in der Chemie ein Ausfällen, „Koagulation“, aus einer Lösung als Niederschlag bezeichnet wird, kann auch der Niederschlag in der Atmosphäre durch ein solches Ausfällen entstehen. Ebenso wie in der Chemie muß dabei auch die elektrische Ladung der Teilchen eine Rolle spielen. Eine elektrolytische Dissoziation in einer Lösung ist bekanntlich ohne elektrische Ladung

⁴⁶⁾ A. Schmauß, Kolloidchemie und Meteorologie. Meteorol. Zeitschr. 87, 1 (1920). - Kolloidforschung und Meteorologie. Meteorol. Zeitschr. 40, 85 (1923).

⁴⁷⁾ R. Zsigmondy, Kolloidchemie. 3. Aufl. Leipzig (Spamer) 1922.

nicht möglich. Auch ein kolloidal gelöster Körper hat eine Ladung gegenüber dem Lösungsmittel, in welchem er schwebt. Schon deswegen müssen also die Kondensationskerne der Atmosphäre und die Wolken-elemente elektrisch sein. Gerade diese Ladung ist vermutlich mit der Grund dafür, daß die Lösung beständig ist und die Teilchen schweben können. Schmauß weist darauf hin, daß hier vielleicht der Schlüssel liegt für das letzte geheimnisvolle Stadium der Niederschlagsbildung. Die Kolloidchemie lehrt, daß bei der Koagulation in solchen Lösungen das Sol nahe an den sogenannten isoelektrischen Punkt gebracht werden muß, das ist der Punkt, wo die Teilchen keine elektrischen Ladungen mehr besitzen und daher ausfallen müssen. Mit der Annäherung an den isoelektrischen Punkt nimmt sofort die Beständigkeit der kolloidalen Lösung ab. Wodurch in der Wolke dieser Zustand eintritt, das entzieht sich freilich noch unserer Kenntnis. Solange die kleinen Wolken-elemente gleichmäßig elektrisch sind, wird ihre Vereinigung hintangehalten, und die Wolke ist beständig. Eine Änderung könnte vielleicht durch plötzliche Sprünge im Leitvermögen mitten in der Wolke erfolgen, wodurch eine Vereinigung der Wolkenelemente zu größeren Tropfen und damit die Niederschlagsbildung zustande käme. Betont muß allerdings werden, daß die starken Ladungen der Wolke erst entstehen können, wenn sich größere feste oder flüssige Niederschlagsformen gebildet haben. |b

3. Allgemeines luftelektrisches Verhalten der Atmosphäre

a) **Das Leitvermögen.** Bevor auf die eigentlichen elektrischen Vorgänge in der Wolke eingegangen wird, scheint es erforderlich, zunächst einmal die allgemeinen elektrischen Eigenschaften der Atmosphäre zu beschreiben. Ebenso wie man die Luftströmungen durch Anwendung der dynamischen und thermodynamischen Gesetze erforscht hat, genau so hat man neuerdings auch die physikalischen Gesetze der Elektrizität auf die atmosphärischen Vorgänge angewandt. Bekanntlich galt die Luft lange Zeit als Nichtleiter für die Elektrizität. Dieser Schluß lag deswegen nahe, weil man sich nur so das Anhäufen so starker Ladungen, wie sie der Blitz offenbarte, erklären konnte. Nun hat aber schon am Ende des 18. Jahrhunderts der französische Physiker Coulomb Versuche ausgeführt, die bewiesen, daß die Luft doch ein Leiter ist. Er zeigte, daß ein geladener Metallkörper in der

Luft seine Ladung verliert und daß dieser Ladungsverlust, „die Elektrizitätszerstreuung“, ganz von dem Wetter abhängt. Allerdings deutete Coulomb seine Versuche falsch. Er glaubte, daß der Staub und Wasserdampf der Luft durch Berührung mit dem Metallkörper elektrisch würden und so dessen Ladung fortrügen. Dazu kam noch ein Meßfehler der Isolatoren, die bei feuchter Luft zu große Entladungen vortäuschten. Hundert Jahre hat sich dieser Irrtum aufrechterhalten, bis Linss⁴⁸⁾ im Jahre 1887 bewies, daß gerade umgekehrt bei trockenem, heiterem Wetter die Zerstreuung am größten ist. Er verwarf also alle Theorien, die sich auf die elektrische Leitfähigkeit der feuchten oder mit Nebeltröpfchen gefüllten Luft stützten. Linss sagt: „Die Niederschlagsteilchen werden stets nur einen kleinen Teil der gesamten Elektrizität der Luft mit sich führen, weil kein Grund zu der Annahme vorliegt, die Elektrizität sei vorzugsweise oder ausschließlich auf den Wasserdampfmolekülen suspendiert/“ Linss ist so der Bahnbrecher der modernen atmosphärischen Elektrizität geworden. Aber seine Versuche und Ausführungen fanden wenig Beachtung, bis sie im Jahre 1899 von Elster und Geitel⁴⁹⁾ wieder aufgenommen wurden, die mit vereinfachten und verbesserten Meßinstrumenten neue grundlegende Versuche über die Elektrizitätszerstreuung ausführten und sie vor allem auch mit Hilfe der modernen Forschungsergebnisse richtig deuteten. Danach sind in der Atmosphäre stets positive und negative elektrische Ladungen vorhanden. Bei positiv geladenem Zerstreuungskörper werden die negativen Luftladungen angezogen, die positiven abgestoßen, bei negativ geladenem Zerstreuungskörper ist es umgekehrt. Die Ladung des Zerstreuungskörpers entweicht nicht etwa in die Luft, sondern die elektrischen Ladungen der Luft wandern an den Körper heran und neutralisieren seine Ladung. Elster und Geitel nannten die elektrischen Teilchen der Luft „Ionen“. Weil aber die Analogie mit den Ionen der Elektrolyse nicht in allen Punkten zutrifft, tut man wohl besser daran, sie nach dem Vorbilde englischer Physiker als „Elektrizitätsträger“ oder kurz als „Träger“ zu bezeichnen; denn sie sind offenbar nicht als reine Elektrizität wie bei den Quanten der

⁴⁸⁾ Dr. Linss, Über einige die Wolken-und Luftelektrizität betreffende Probleme. Meteorol. Zeitschr. 4, 345 (1887).

⁴⁹⁾ J. Elster und H. Geitel, Über einen Apparat zur Messung der Elektrizitätszerstreuung in der Luft. Physik. Zeitschr. 1, 11 (1899). — Beiträge zur Kenntnis der atmosphärischen Elektrizität. Physikal. Zeitschr. 1, 245 (1900).

Kathodenstrahlen in der Luft, sondern an etwas Körperliches gebunden, das die Elektrizität trägt.

Die allgemeinen Gesetze des Leitvermögens in Luft sind 1903 von Riecke⁵⁰⁾ aufgestellt worden. Das Leitvermögen X setzt sich, ähnlich wie im Elektrolyten, aus einem positiven λ_+ und negativen λ_- Anteil zusammen:

$$\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$$

Daß einzelne X ist proportional einmal der spezifischen Ladung s eines jeden Trägers, dann der Anzahl n der Träger im Kubikzentimeter und schließlich der Wanderungsgeschwindigkeit v der Träger

$$\lambda = \epsilon \cdot n \cdot v$$

Für viele Beobachtungen von Wert ist ferner das Verhältnis der beiden Leitfähigkeiten

$$q = \frac{\lambda_+}{\lambda_-}$$

das ein Maß gibt für den Überschuß des positiven Leitvermögens über das negative, also auch, da e und v bei beiden Vorzeichen nicht sehr verschieden sind, ungefähr für den Überschuß der Zahl der positiven Träger über die negativen.

Das Leitvermögen am Erdboden ist nun, wie viele über die ganze Erde sich erstreckende Messungen zeigen, großen Schwankungen unterworfen. In Mitteleuropa treten die Höchstwerte ein im Sommer, die Tiefstwerte im Winter, und zwar sind die Juliwerte etwa 1,6 mal so groß als die Januarwerte. Die tägliche Schwankung ist in den einzelnen Monaten recht verschieden, doch ist die Leitfähigkeit stets nachts, gegen 4 Uhr morgens, am größten. Die Größe q hat in Mitteleuropa die höchsten Werte 1,3 im Winter, die tiefsten 1,1 im Sommer; ebenso ist q nachts fast stets größer als mittags. Der Einfluß des Wetters auf das Leitvermögen ist recht bedeutend. Die höchsten Werte von λ und kleinsten von q treten ein bei klarem Wetter, die kleinsten von λ und größten von q bei starkem Dunst und Nebel.

Ganz enorme Schwankungen der beiden Größen X und q zeigen sich vor, während und nach Gewittern und Böen, q kann dann schwanken von 4 bis 0,3, d. h. in den Luftmassen, die bei Gewittern am Erdboden

⁶⁰⁾ E. Riecke, Beiträge zu der Lehre von der Lufterlektrizität. Annalen der Physik. Neue Folge 12, 52 (1903).

lagern, kann die eine Trägersorte die andere um das 3- bis 4 fache überwiegen.

Die Leitfähigkeit nimmt mit der Höhe zu. In den untersten 1500 m finden sich allerdings wegen der dort lagernden Dunstschichten große Schwankungen. Vor allem in den Höhen über 3000 m tritt aber das Anwachsen deutlich hervor. So wurde in 6000 m eine Leitfähigkeit gemessen, die etwa 20 mal so groß war als am Boden; in 9000 m wieder ungefähr das Doppelte wie in 6000 m.

Die im Leitvermögen enthaltene Größe ϵ , die spezifische Ladung der Träger, das sogenannte „Elementarquantum“ der Elektrizität, ist durch Laboratoriumsversuche, vor allem durch neuere Meßreihen des Amerikaners Millikan zu $4,8 \times 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten bestimmt worden. Die Größe $n \cdot s$, „Ionendichte“ oder „Trägerdichte“ genannt, läßt sich messen, indem man einer bekannten Luftmenge in einem axialen elektrischen Felde alle Träger entzieht. Mit Hilfe des bekannten ϵ läßt sich dann berechnen. So findet man am Erdboden insgesamt etwa 2000 bis 10000 Träger im Kubikzentimeter. Von diesen sind etwa 600 bis 900 leichtbewegliche, d. h. Träger, die schon durch ein schwaches Feld entladen werden, eine Anzahl mittelbewegliche und die Mehrzahl schwerbewegliche, d. h. sie werden erst durch ein sehr starkes Feld entladen. Mit wachsender Höhe nimmt die Zahl der leichtbeweglichen zu. In 4000 bis 6000 m ist sie etwa 2000, also etwa 3 mal so groß als am Erdboden.

Die Messung der Größe v , der Wanderungsgeschwindigkeit oder Trägerbeweglichkeit, ist deswegen wichtig, weil sie Schlüsse gestattet auf Natur und Zusammensetzung der Träger. Je größer v ist, um so geringer muß die Masse des Trägers sein. Lenard⁵¹⁾ hat durch Rechnung gezeigt, daß die Masse der leichtbeweglichen Träger ungefähr gleich der der Luftmoleküle ist. Wichtig ist, daß die Geschwindigkeit der leichtbeweglichen negativen Träger stets etwas größer ist als die der positiven. So fand Gerdien zum Beispiel

$$v_- = 1,5 \text{ bis } 1,8 \text{ cm/sec für ein elektrisches Feld von } 1 \text{ Volt/cm}$$

$$v_+ = 1,3 \text{ bis } 1,4 \quad „ \quad „ \quad „ \quad „ \quad „ \quad „ \quad 1 \quad „$$

Die Umwandlung der leichtbeweglichen in mittel- und schwerbewegliche Träger hat man sich durch Anlagern neutraler Moleküle an das elek-

⁵¹⁾ P. Lenard, Über die Elektrizitätszerstreuung in ultraviolett durchstrahlter Luft. Annalen der Physik, N. F. 3, 312 (1900).

trische zu erklären. Die Wanderungsgeschwindigkeit der mittelbeweglichen ist etwa 0,01 cm/sec für 1 Volt/cm. Ihre Masse ist also etwa 100mal größer als die der leichtbeweglichen. Die Wanderungsgeschwindigkeit der schwerbeweglichen ist mehr als 1000mal so klein als die der leichtbeweglichen, ihre Masse demnach noch wesentlich größer, und es steht der Annahme nichts im Wege, daß bei ihnen die Ladung an den kleinen Dunst- und Wasserteilchen gelagert ist. Daher nimmt im Dunst stets die Anzahl der leichtbeweglichen ab und die der schwerbeweglichen zu. Auch die Träger mittlerer Beweglichkeit können durch Anlagern an Kondensationskerne entstehen. Der australische Physiker Pollock hat gezeigt, daß die Beweglichkeit der schweren Träger stark von der absoluten Feuchtigkeit der Luft abhängt. Mit wachsender Feuchtigkeit nimmt sie ab. Pollock glaubt, daß die schwerbeweglichen aus einem festen Kern mit flüssiger Wasserhülle, die mittelbeweglichen aus Luftmolekülen mit einer Wasserdampfhülle bestehen.

b) Das Spannungsgefälle. Es erscheint uns jetzt selbstverständlich, daß bei einem Gewitter starke elektrische Spannungsunterschiede zwischen Wolke und Erde bestehen. Aber erst im Jahre 1746 hat Winkler als erster mit Hilfe der kurz vorher erfundenen v. Kleist'schen Flasche, dem Urbild der Leydener Flasche, Blitz und Donner künstlich nachgemacht. In seinem berühmten Briefe an Collinson vom Jahre 1750 machte dann Franklin seinen Vorschlag zur experimentellen Prüfung der Wolkenelektrizität, der die Grundlage des Blitzableiters wurde. 1752 führte Franklin seinen ersten Drachenversuch aus. Überall wurden dann solche Versuche mit Stangen und Drachen aufgenommen. Selbst der Tod Richmanns in St. Petersburg, der 1753 bei solchen Versuchen vom Blitz erschlagen ward, hielt den Eifer nicht auf. Schon bei diesen Versuchen kam die Erkenntnis, daß auch bei gutem Wetter Spannungsunterschiede zwischen Erde und Atmosphäre vorhanden sind, und zwar ist die Luft stets positiv gegenüber der Erde. Das Spannungsgefälle wird um so höher, je größer die Entfernung der Meßstelle, des „Kollektors“, vom Boden ist. Der Franklinsche Drache gibt bei genügend langem Draht auch bei heiterem Wetter so große Spannungsunterschiede, daß an Unterbrechungsstellen des Drahtes Funken entstehen.

In der Atmosphäre herrscht also stets ein elektrisches Kraftfeld, dessen Niveauflächen parallel, dessen Kraftlinien senkrecht zur Erde

verlaufen. Die Erde hat eine negative Oberflächenladung, die sich zu ungefähr -3×10^{14} elektrostatischen Einheiten pro Quadrat-zentimeter berechnet. Die Gesamtladung der Erde beträgt -1×10^{15} elektrostatische Einheiten oder -3×10^5 Coulombs. Die Erde ist ein so großer Körper und als ein so vollkommener Leiter von so großer Kapazität anzusehen, daß die Beträge an Elektrizität, die an irgendeiner Stelle ihrer Oberfläche ihr hinzugefügt oder entnommen werden, ihr Potential nicht zu ändern vermögen. Deswegen wird das Potential der Erde als Vergleichspotential gewählt und herkömmlich gleich Null gesetzt.

Das luftelektrische Feld wird nur da normal verlaufen können, wo der Erdboden eben ist. Durch jeden Gegenstand, jedes Haus oder jeden Baum z.B., werden die Niveauflächen gehoben, die Kraftlinien angehäuft. Beispielsweise ist am Fuße eines Turmes das Feld sehr viel kleiner, an der Spitze dagegen sehr viel größer, als wenn der Turm nicht da wäre. Das ist wichtig bei den elektrischen Entladungen einer Wolke, die naturgemäß am leichtesten erfolgt zu Stellen, die schon am Erdboden verstärkt sind.

Das elektrische Feld der Erde ist nun, selbst bei ruhigem Wetter, den allergrößten Schwankungen unterworfen. In Mitteleuropa ist es am stärksten im Januar, am kleinsten im Juni—Juli. Der Jahresmittelwert beträgt 1 m über dem Boden etwa + 200 Volt gegen die Erde. Die höchsten Werte bei niederschlagslosem Wetter erreichen im Winter bei starkem Nebel oder Dunst fast + 1000 Volt/m. Die tägliche Schwankung zeigt im Winter eine einfache, im Sommer eine doppelte Periode; stets findet sich gegen 4 Uhr morgens Ortszeit ein tiefes Minimum, das nur im Sommer durch viel tiefere Mittagswerte untertroffen wird. Der Einfluß des Wetters auf die Potentialgefällewerte am Boden ist recht groß. Schon durch geringfügige Ursachen, z. B. durch Rauch und Staub, können große örtliche Änderungen hervorgerufen werden. Rauch erhöht meistens die Werte, Staub gibt dagegen, vor allem in Verbindung mit starken Winden, am Boden negative Gefällewerte. Das ist schon 1860 von Werner Siemens auf der Cheopspyramide gezeigt worden. Eine hochgehaltene Flasche, die mit feuchtem Papier umwickelt war, lud sich dabei so stark negativ auf, daß er aus ihr Funken ziehen konnte. Auch Schneestaub oder Blütenstaub kann ähnlich wirken. Wir lernen hier eine Elektrizitätsquelle kennen, die in den Wüsten und Polargebieten eine große Rolle spielen muß, ja die

unter Umständen zu „trockenen“* Gewittern und „Staubgewittern“ führen kann. Die Erklärung für dieses Verhalten der staubhaltigen Luft ist nach Messungen von Kahler⁵²⁾ in einer Lenardwirkung an den festen Teilchen zu suchen, aus denen ähnlich wie bei den Wassertropfen kleinste negative Teilchen ausgeschleudert werden, so daß der Rest positiv geladen zurückbleibt. Diese schwerbeweglichen positiven Träger fallen leichter zu Boden, während die leichter beweglichen negativen vom Wind in die Höhe geführt werden und so die oben beschriebenen Wirkungen zustande bringen.

Große Schwankungen des Potentialgefälles, meistens Erhöhungen der positiven Werte, treten ein im Nebel und Dunst, also auch mitten in der Wolke. In dem Dunst und Wasserdampf bleiben die Träger stecken, gleichzeitig werden sie unbeweglicher, so daß die Leitfähigkeit abnimmt, das Gefälle aber steigt. Doch sind diese Vorgänge rein örtlich, deswegen ist im allgemeinen ein Wolkeneinfluß bis zum Erdboden nicht vorhanden, schon darum nicht, weil eine eigentliche Elektrizitätstrennung mit diesen Vorgängen nicht verbunden ist. Anders ist es unter Böen- und Gewitterwolken, die, auch ohne daß Regen aus ihnen fällt, das elektrische Feld am Boden stark erhöhen oder erniedrigen können. Hier hat eine Elektrizitätstrennung in und unter der Wolke schon stattgefunden. Es handelt sich nicht um eine Wolkeninfluenz, sondern es ziehen, wie Kahler⁵²⁾ durch Raumladungsmessungen zeigte, mit der Wolke Ladungen mit, die bis zum Erdboden herunterreichen. Die stärksten Störungen des elektrischen Erdfeldes treten ein durch die Niederschläge. Schon leichter Regen und Sprühregen bewirken eine Abnahme der positiven Potentialgefällewerte; Landregen beginnen fast immer in Mitteleuropa mit negativen Werten und auch während ihrer Dauer überwiegen diese Werte bei weitem. Im allgemeinen geht aber die Feldstärke nicht oft über — 1000 Volt/m hinaus. Stärkere Regen, wie z. B. Regenschauer, liefern höhere Felder und zugleich schon einen Wechsel zwischen beiden Vorzeichen. Am stärksten wird dieser Wechsel bei Regen-, Graupel- und Schneeböen, sowie bei Gewittern. Einzelwerte gehen dann über ± 10000 Volt/m am Boden hinaus. Ruhiger Schneefall zeigt im Gegensatz zum Landregen in Mitteleuropa eher zackiges positives Gefälle.

⁵²⁾ K. Kahler, Über die Ursache einiger einfachen luftelektrischen Störungen. Meteorol. Zeitschr. 39, 293 (1922).

Ein Gemenge von Schnee und Regen gibt wieder häufigeren Vorzeichenwechsel.

Schon Linss⁴⁸⁾ hat 1887 darauf aufmerksam gemacht, daß die bis dahin allein übliche Messung des Potentialgefälles für die Erkennung des luftelektrischen Verhaltens der Atmosphäre nicht ausreicht. Es kann unter Umständen sehr wohl die Wirkung der nächstgelegenen Luftschicht durch eine andere, z. B. höher gelegene verdeckt werden. Linss zeigt das an einem Beispiel durch Rechnung. Aus der Tatsache, daß in dem Gebiet eines ausgedehnten Regens die negative, eines ausgedehnten Schneefalls die positive „Luftelektrizität“, wie man damals sagte, überwiegt, läßt sich also an und für sich noch nicht schließen, daß die Regenwolken negativ, die Schneewolken positiv elektrisch sind. So einfach liegen die Verhältnisse nicht, es kann ebenso gut das Gegenteil der Fall sein. Wie wir später sehen werden, müssen sogar anfangs in der Wolke beide Vorzeichen gleich stark vorhanden sein. Erst die Wirkung des Niederschlagsprozesses führt zu einer teilweisen Trennung der Vorzeichen und schafft damit die Vorbedingungen für die Gewitterentladungen.

Mit wachsender Höhe über dem Boden nimmt, wie Ballonmessungen zeigen, das Potentialgefälle, bezogen auf 1 m Luftabstand, ab. Nachdem schon am Anfang des 19. Jahrhunderts Gay-Lussac und Biot eine solche Fahrt mit luftelektrischen Beobachtungen unternommen hatten, haben vor allem die gegen Ende des Jahrhunderts in Wien und Berlin ausgeführten Ballonfahrten darüber Aufschluß gebracht. Später sind solche wissenschaftlichen Fahrten vor allem von Halle aus unternommen worden. Danach schwanken in den untersten 1500 m die Werte sehr wegen des häufigen Dunstgehalts dieser Höhen, erst darüber setzt eine rasche Abnahme ein. In 4000 bis 6000 m sind Werte von 10 bis 6 Volt/m gefunden worden, in 9000 m erhielt Everling noch 3 Volt/m. Im wesentlichen drängen sich also die Raumladungen der Luft auf die untersten 5 bis 6 km zusammen. Damit ist aber nicht gesagt, daß die Schichten darüber, auch die höchsten Schichten, ohne jeden Einfluß auf die Vorgänge nahe dem Boden sind. Neuerdings bespricht Swann⁵³⁾, die Gedanken von Linss wieder aufnehmend, den Einfluß einer etwa 50 km hohen leitenden Schicht, wie man sie im Erdmagnetismus und

¹⁸⁾ Siehe Seite 52.

⁵³⁾ W. F. G. Swann, Ungelöste Probleme der kosmischen Physik. Journal of the Franklin Institute, April 1923, S. 432.

in der drahtlosen Telegraphie zur Erklärung dieser Erscheinungen annimmt, auch für die atmosphärische Elektrizität. Ist eine solche Schicht vorhanden, so muß eine geladene Wolke etwa in 5 km Höhe nicht nur das Potentialgefälle dort ändern, wo sie sich befindet, sondern, weil die Potentialdifferenz zwischen der 50 km-Schicht und der Wolke stets gleich bleiben muß, auch an allen anderen Punkten der Erde. Swann rechnet aus, daß auf der Gegenseite der Erde diese Wirkung noch ein Zehntel so groß sein muß, als wenn die 5 km-Wolke rund um die Erde verteilt wäre. Mit Hilfe einer solchen hohen leitenden Schicht wird also jede Trennung der positiven und negativen Ladungen an irgendeinem Punkte der Atmosphäre einen positiven oder negativen Beitrag zum allgemeinen Potentialgefälle an der Erdoberfläche liefern können.

c) Die elektrischen Ströme in der Atmosphäre. Die negative Ladung der Erde und das dauernde Vorhandensein positiver und negativer Ladungen in der Luft muß ein dauerndes Strömen von Elektrizität in ihr zur Folge haben. Die positiven Träger wandern zum Erdboden, die negativen von ihm fort. Dieser „Leistungsstrom“, wie Ger dien ihn nannte, wird fortwährend überdeckt und gestört durch die vertikale und horizontale Luftbewegung, wodurch mechanisches Forttragen von Elektrizität eintritt, der „Konvektionsstrom“. Man kann den Leistungsstrom direkt messen und sich dabei der Franklinschen Drachenmethode bedienen. Auf diese Weise maß Peltier in Frankreich zuerst galvanometrisch den Strom, ebenso L. Weber⁵⁴⁾ 50 Jahre später in Breslau und auf dem Kamm des Riesengebirges. Weber fand während eines Gewitters Stromstöße bis zu etwa 6×10^{10} Ampere. Ferner maß er galvanometrisch den Strom, der in einen isoliert aufgestellten Baum einströmt. Diese Stromstärke kann schon bei ruhigem Wetter in hochragenden Gegenständen recht beträchtlich werden. So gibt eine 50 m hohe Antenne Ströme von etwa 10^{-9} Ampere. Ebert⁵⁵⁾ fand 1901, indem er einen Teil der ebenen Erdoberfläche isolierte, als Wert für den normalen Leistungsstrom

⁵⁴⁾ L. Weber, Mitteilungen, betreffend die im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins ausgeführten Untersuchungen über atmosphärische Elektrizität. Elektrotechn. Zeitschr. 9, 189 (1888) und 10, 387, 521 u. 571 (1889).

⁵⁵⁾ H. Ebert, Galvano metrische Messung des elektrischen Ausgleichs zwischen den Ionenladungen der Atmosphäre und der Ladung der Erdoberfläche. Physikal. Zeitschr. 3, 338 (1902).

2×10^{16} Ampere pro Quadratcentimeter. Es handelt sich also im allgemeinen um recht kleine Ströme. Indirekt läßt sich der Leitungsstrom aus dem Produkt von Leitvermögen und Potentialgefälle berechnen. So erhält man etwa 1×10^{16} elektrostatische Einheiten, das ist 3×10^{16} Ampere/cm², also denselben Wert wie bei den direkten Messungen.

Da sich die meist entgegengesetzten Schwankungen von Leitvermögen und Potentialgefälle aufheben, so ist der Leitungsstrom viel konstanter als diese beiden Faktoren. Auch mit wachsender Höhe ändert er sich anscheinend nicht erheblich.

d) Die Eigenladungen der Niederschläge. Schon im Jahre 1860 hat W. Thomson (Lord Kelvin)⁵⁶⁾ die Wichtigkeit solcher Messungen erkannt und sogar schon einige Versuche mit einem „Elektro-Pluviometer**“ genannten Apparat gemacht, über deren Ergebnisse aber nichts bekannt geworden ist. In Deutschland wies Linss⁴⁸⁾ nachdrücklich auf die Bedeutung solcher Beobachtungen hin. Er hebt auch schon die Wichtigkeit des Niederschlagsprozesses bei der Scheidung der beiden Elektrizitäten hervor. Kurze Zeit darauf führten die beiden Wolfenbütteler Forscher Elster und Geitel⁵⁷⁾ die ersten exakten Messungen aus. Die Niederschläge wurden in einem isolierten Metallgefäß aufgefangen, das mittels einer gegen Influenz geschützten Leitung mit einem Elektrometer verbunden war. Es war aber nötig, das Auffanggefäß gegen die Influenzwirkung des Erdfeldes, sowie vor der Abspritzwirkung der Tropfen und Schneeflocken zu schützen. Die ganze Meßvorrichtung wurde daher mit einer Reihe von Schutzbauten umgeben. Eine weitere Fehlerquelle dieser festen Versuchsanordnung wäre die Lenardwirkung (Wasserfallwirkung) des auffallenden Regens, wodurch dieser positiv, versitzende feine Tröpfchen negativ elektrisch werden. Da jedoch die Ventilation im Auffanggefäß recht gering ist, wird es zu keiner ordentlichen Elektrizitätstrennung kommen, die verspritzenden negativen Tröpfchen verbleiben im wesentlichen im Auffanggefäß.

Schon bei den ersten Messungen im Sommer 1887 zeigte es sich,

⁵⁶⁾ Lord Kelvin, Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism. 2. Aufl. London (Macmillan) 1884, S. 221.

⁴⁸⁾ Siehe Seite 52.

⁵⁷⁾ J. Elster und H. Geitel, Über eine Methode, die elektrische Natur der atmosphärischen Niederschläge zu bestimmen. Meteorol. Zeitschr. 5, 95 (1888).

daß die Niederschläge fast stets wechselnde Ladungen trugen, die häufiger dem Potentialgefälle entgegen als gleich waren. Im Jahre 1890 stellten Elster und Geitel⁵⁸⁾ die Ergebnisse von etwa 600 Beobachtungen zusammen. Bei den Regenfällen unterscheiden sie zwischen Landregen, Regengüssen und Gewitterregen. Beim Landregen war bei der angewandten Elektrometerempfindlichkeit der Ausschlag meistens sehr schwach. Die Meßergebnisse Elsters und Geitels beziehen sich also vorzugsweise auf Böen- und Gewitterregen. Aus gleichzeitigen Potentialgefällebeobachtungen ging hervor, daß bei diesen Regenarten die Niederschlagselektrizität fast stets in bezug auf den Zeichenwechsel von größerer Trägheit ist als beim Potentialgefälle. Das wird nicht wundernehmen, denn die Eigenladung der Niederschläge ist eine viel einfachere Meßgröße als das verwickeltere Potentialgefälle. Groß ist die Neigung der Eigenladung, das entgegengesetzte Vorzeichen wie das Potentialgefälle anzunehmen. Es kommen aber auch längere Meßreihen vor, bei denen beide die gleichen Vorzeichen und gleichen Schwankungen haben. Dem Vorzeichen nach überwogen die negativen Eigenladungen beim Regen, dagegen die positiven bei Schnee. Einige Tropfen, vor allem Sprühregen aus dem Rande von Gewitterwolken hatten oft recht hohe Ladungen. Elster und Geitel haben ihre Messungen bis zum Jahre 1893 fortgesetzt. In einer Zusammenstellung aus dem Jahre 1899⁵⁹⁾ bringen sie 17 Beispiele von gleichzeitigen Beobachtungen der Eigenladung und des Gefälles in Kurvenform. Die zur Erde gelangenden Ladungen sind oft recht groß. Im Höchstfall wurde innerhalb 5 Minuten einmal eine Spannung von 1000 Volt im Elektrometer erreicht; das ergibt, mit Hilfe der Kapazität des Auffanggefäßes umgerechnet, einen Strom von 76×10^{-14} Coulombs pro Sekunde und Quadratcentimeter oder etwa 8×10^{-13} Ampere pro Quadratcentimeter, also einen Strom, der mehr als 1000 mal so stark war als der normale Leitungsstrom.

Die erste Registrierung der Niederschlagselektrizität führte Gerdien⁶⁰⁾ im Sommer 1902 in Göttingen aus. Er leitete die Ladungen

⁵⁸⁾ J. Elster und H. Geitel, Beobachtungen, betreffend die elektrische Natur der atmosphärischen Niederschläge. Wiener Sitzungsberichte II a, 99, 421 (1890).

⁵⁹⁾ J. Elster und H. Geitel. Beobachtungen über die Eigenelektrizität der Niederschläge. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 4, 15 (1899).

⁶⁰⁾ H. Gerdien, Registrierungen der Niederschlagselektrizität im Göttinger Geophysikalischen Institut. *Physikal. Zeitschr.* 4, 837 (1903)..

vom Auffanggefäß durch einen großen Widerstand zur Erde und registrierte photographisch die Stromschwankungen dieses Systems. Gleichzeitig wurden Potentialgefälle und zum ersten Male auch die Niederschlagsmenge aufgezeichnet. Ger dien trennt ebenfalls nach Land-, Böen- und Gewitterregen. Im ganzen überwogen die negativen Ladungen. Bei Landregen ist die häufigste Stromdichte 10^{-14} Amp./cm², bei Böenregen, wo gleichzeitig ein stärkerer Wechsel der Vorzeichen eintritt, geht sie bis 10^{-18} , bei Gewittern bis 10^{-12} Amp./cm².

Einen ganz anderen Beobachtungsweg schlug Weiß⁶¹⁾ ein. Um ganz sicher den Abspritz-, Influenz- und Wasserfallfehler zu vermeiden, setzte er eine gut isolierende Metallbürste, die alle Tropfen aufspießt, ohne sie verspritzen zu lassen, dem Regen aus und trug sie dann ins Innere eines Beobachtungsraumes, um dort ihre Spannung zu messen. Außer dem Potentialgefälle bestimmte er auch die Tropfengröße nach der Wiesnerschen Methode¹⁶⁸⁾. Die Weißschen Beobachtungen umfassen die Monate Januar bis April 1906. Bei Regen sind Eigenladung und Potentialgefälle meistens entgegengesetzt: Die eine Kurve ist das Spiegelbild der anderen. Bei der Eigenladung überwiegt bei Weiß das positive Zeichen. Bei Schnee sind Gefälle und Eigenladung eher gleich in ihren Schwankungen; in der Schneelektrizität überwog ebenfalls das positive Vorzeichen. Die Spannungen einzelner Tropfen und Flocken überschreiten bisweilen 10 Volt. Im Höchstfall fand Weiß 43 Volt. Ihre Ladung pro Gewichtseinheit (g) beträgt meistens 1 elektrostatische Einheit, im Höchstfall 35.

Im Jahre 1908 untersuchte Kahler⁶²⁾ in Potsdam aus einjährigem Registriermaterial, wobei stets die Ladung innerhalb zweier Minuten aufgezeichnet wurde, insgesamt 265 Niederschläge aller Formen. Die von Ger dien aufgestellten Werte für die Stromdichte gelten nur in großen Zügen, weil nicht immer eine scharfe Trennung zwischen den einzelnen Regenarten möglich ist. Vielfach zeigen Regen, die sich im

⁶¹⁾ E. Weiß, Beobachtungen über Niederschlagslektrizität. Wiener Sitzungsberichte IIa. 115. 1285 (1906).

¹⁶⁸⁾ Siehe Seite 124.

⁶²⁾ K. Kähler, Registrierungen der Niederschlagslektrizität mit dem Bennedorf-Elektrometer. Physika). Zeitschr. 9,258 (1908). — Ergebnisse der Registrierungen der Niederschlagslektrizität zu Potsdam im Jahre 1908. Ergebnisse der Meteorologischen Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1908. Berlin (Behrend u. Co.) 1909 Auszug: Meteorol. Zeitschr. 27, 326 (1910).

Luftdruck und Wind nicht bemerkbar machen, luftelektrisch dasselbe Verhalten wie Böen. Am ehesten würde man wohl gerade das luftelektrische Verhalten eines Niederschlags dazu benutzen können, um nichtböigen und böigen Regen zu trennen. Von den 101 Landregen, die einen merklichen Ausschlag im Elektrometer gaben, hatten 55, davon viele von stundenlanger Dauer, nur negatives Potentialgefälle und positive Eigenladungen; dagegen 10 meist nur ganz kurze Regen nur negative Eigenladungen. Bei ruhigem Schnee tritt im Gegensatz dazu das negative Vorzeichen bei der Eigenladung häufiger auf. Ein Gemenge von Schnee und Regen gibt in der Regel große wechselnde Ladungen. Bei Böen und Gewittern halten sich beide Vorzeichen ungefähr die Wage. Die Ladung der Volumen- oder Gewichtseinheit kann dann die Zahl 40 elektrostatische Einheiten pro Kubikzentimeter überschreiten. Im ganzen überwog in Potsdam im Jahre 1908 bei den zum Erdboden gelangenden Niederschlägen etwas das positive Vorzeichen. Bei den Landregen herrscht in Potsdam durchaus das spiegelbildliche Verhalten zwischen Potentialgefälle und Niederschlagselektrizität vor. Dagegen sind bei Böen und Gewittern meistens keine Zusammenhänge zu erkennen. Nur die schon von Elster und Geitel hervorgehobene größere Einfachheit in der Schwankung der Niederschlagselektrizität kehrt stets wieder. So ist z. B. immer der erste Ausschlag, den die Bö im Potentialgefälle hervorruft, die „Frontwirkung“ der Bö, nicht in der Niederschlagselektrizität vorhanden, ebensowenig die „Rückseitenwirkung“. Elster und Geitel vermuteten im Jahre 1899 und fanden das an einigen Beispielen bestätigt, daß Potentialgefälle und Eigenladung am Ende des Regens eher und häufiger entgegengesetzt sind als am Anfang. Es könnte das ein Beweis dafür sein, daß der Regen ein Vorzeichen zur Erde führt, während das andere in der Luft zurückbleibt. Doch findet sich das in den Potsdamer Registrierungen nicht bestätigt. Die typischen Landregen zeigen schon von vornherein entgegengesetztes Vorzeichen zwischen Potentialgefälle und Niederschlagsladung.

Ungefähr gleichzeitig und unabhängig von Potsdam hat Simpson⁶³⁾ nach derselben Methode in Simla in Indien (etwa 2300 m Meereshöhe) während zweier Regenperioden April bis September 1908 und

⁶³⁾ G. C. Simpson, Über die Elektrizität des Regens und seine Entstehung in Gewittern. Philosophical Transactions of the Royal Society, London A, 209, 379 (1909) und Indian Meteorological Memoirs 20, 141 (1910).

1909 die Niederschlagselektrizität registriert. Auch hier wurden schwach elektrische Regen meistens nicht mit aufgezeichnet. Da sowieso in den Subtropen der Landregen selten ist, so hat Simpson im wesentlichen nur Gewitterregen gemessen. Er spricht eingangs mal von „rain storms“, sonst fast stets von „thunderstorms“. Diese Tropengewitterregen ergaben einen ganz bedeutenden Überschuß des positiven Vorzeichens: Positive und negative Ladungen verhielten sich der Zeit nach wie 2,9 : 1, der Menge nach wie 2,4 : 1. Je größer die elektrische Stromdichte des Regens war, um so mehr überwog das positive Zeichen. Bei der Stromdichte 3×10^{-13} Amp./cm² war das Verhältnis schon auf 8 : 1 gestiegen. Ebenso nahm das Verhältnis mit wachsender Regenstärke zu. Die Ladungen der ergiebigsten Regen, stärker als 1 mm Niederschlag in 2 Minuten, waren nur noch positiv. Die höchsten Ladungen der Volumeneinheit hat aber der leichtere Regen. Als mittlere Einheitsladung fand Simpson 0,34 elektrostatische Einheiten pro Kubikzentimeter, als Höchstwert 20. Das Potentialgefälle war im Gegensatz zur Niederschlagselektrizität häufiger negativ als positiv, aber nur etwa im Verhältnis 2: 1 der Zeit nach. Bei den Messungen des Jahres 1909 registrierte Simpson auch die Eigenladungen von 9 Schneefällen, die aber von Graupeln untermengt und meist auch von Blitz und Donner begleitet waren. Er fand außerordentlich hohe Eigenladungen, die erheblich höher als die vom Regen waren, und ebenfalls ein starkes Überwiegen der positiven Werte.

Weitere Messungen der Niederschlagselektrizität wurden in den folgenden Jahren in Frankreich von Baldit und in Irland von Mc. Clelland und Nolan ausgeführt. Sie ergaben ebenfalls positive Überschüsse. Von Interesse ist besonders eine Meßreihe, die Berndt⁶⁴⁾ in Buenos-Aires, Argentinien, nach der Weißsehen Methode erhielt. Er fand vom Juli 1911 bis Januar 1912 doppelt so häufig positiven als negativen Regen; als mittlere Einheitsladung +0,70 und —1,07, als größte Einheitsladung 19. Beim Landregen überwog das negative Vorzeichen, dagegen war bei Böen und Gewittern das positive sehr viel häufiger. Dagegen erhielt Herath⁶⁵⁾, der galvanometrisch die

⁶⁴⁾ G. Berndt, Lufterlektrische Beobachtungen in Argentinien. Veröffentlichungen des Deutschen Wissenschaftlichen Vereins in Buenos-Aires Nr. 3. Berlin 1913. Referat Meteorol. Zeitschr. 30, 363 (1913).

⁶⁵⁾ F. Herath, Die Messung der Niederschlagselektrizität durch das Galvanometer. Physikal. Zeitschr. 15, 155 (1914).

in eine große, isolierte Fläche einfließende Niederschlagselektrizität maß, im Winter 1911/12 in Kiel 15 mal so oft positive als negative Werte bei Landregen.

Das größte Material über Niederschlagselektrizität hat Schindelhauer⁶⁶⁾ veröffentlicht, der die drei Jahre 1909 bis 1911 der von ihm verbesserten und erweiterten Potsdamer Registrierung bearbeitete. In diesem Zeitraum war das Verhältnis des positiven Vorzeichens zum negativen der Zeit nach wie 2,2: 1, der Menge nach jedoch nur 1,4: 1, das heißt: die positiven Ladungen sind in Mitteleuropa zwar viel häufiger, aber kleiner als die negativen. Als mittlere Einheitsladung findet Schindelhauer 0,38, oder, wenn auch die unelektrischen, keinen Ausschlag im Elektrometer gebenden Regen berücksichtigt werden, 0,17 elektrostatische Einheiten im Kubikzentimeter. Der positive Überschuß ist im Frühjahr und Sommer am geringsten, im Winter am größten. Im Frühjahr ist auch die elektrische Tätigkeit am größten, denn es gelangen dann insgesamt ± 5 , in der Summe also 10, elektrostatische Einheiten zum Erdboden, im Sommer $\pm 3,5$, Summe 7, im Herbst nur $+ 2,6 - 1,7$, Summe 4, im Winter wieder bedeutend mehr $+ 5,6 - 2,3$, Summe 8. Dasselbe Bild ergibt sich bei den mittleren Einheitsladungen, die im Jahre 0,17, im Frühjahr 0,28, im Sommer 0,12, im Herbst 0,11, im Winter wieder 0,17 betrugen. Die atmosphärische Elektrizitätsquelle ist also am ergiebigsten im Frühjahr, am spärlichsten im Herbst.

Das einfachste elektrische Verhalten zeigen die Landregen, worunter Schindelhauer einen Regen von mindestens 2 Stunden Dauer von gleichmäßiger Stärke und ohne plötzliche Barometerschwankungen versteht. 33 so aus dem Gesamtmaterial ausgesonderte Regen lieferten fast durchweg geringe positive Ladungen und geringe Einheitsladungen (Höchstwert 3,8 elektrostatische Einheiten im Kubikzentimeter). Bei den Gewitterregen, im ganzen 60, sind beide Vorzeichen gleich häufig. Man erhält große Ladungen und große Einheitsladungen, die im Mittel 10 mal stärker sind als bei Landregen (Höchstwert 35). Als Böenregen bezeichnet Schindelhauer Regen mit Barographen-Nase und Cumulo-Nimbus samt Alto-Stratus-Schirm. 30 so ausgesuchte Böenregen ergaben einen deutlichen negativen

⁶⁶⁾ F. Schindelhauer, Über die Elektrizität der Niederschläge. Abhandlungen des Preussischen Meteorologischen Instituts IV, Nr. 10. Berlin (Behrend u. Co.) 1913.

Überschuß. Die Größe der Ladungen und Einheitsladungen stehen denen der Gewitterregen in keiner Weise nach. Der Unterschied zwischen den drei Regentypen läßt sich so aussprechen: Bei Landregen regnen in erster Linie die positiven Tropfen ab. Da aber eine weitgehende Vereinigung der Tropfen stattfinden kann, sind die Volumenladungen nur gering. Beim Gewitterregen regnen alle Tropfen ab, daher kein Überschuß eines Vorzeichens, beim Böenregen eher die negativen. 29 Graupel- und Hagelfälle lieferten im Gegensatz zu den Böenregen einen deutlichen positiven Überschuß, vor allem bei den großen Stromdichten. Die Einheitsladung ist etwa von derselben Größenordnung wie bei Böen und Gewittern (Höchstwert 34). Schließlich ergaben 57 Schneefälle in sämtlichen Stromdichten ein Überwiegen der negativen Ladungen. Auch die Schneeböen, bei denen die höchsten Stromdichten auftreten, behalten den negativen Überschuß. Sowohl bei Regen als bei Schnee nimmt die Ladung der Volumeneinheit ab mit wachsender Niederschlagsstärke, d. h. kleintropfiger Regen oder schwacher Schnee sind stets elektrischer als großtropfiger, beziehungsweise großflockiger Niederschlag. Beim Regen sind stets die negativen, beim Schnee dagegen die positiven Einheitsladungen größer als das andere Vorzeichen derselben Niederschlagsstärke. Ebenso nimmt beim Regen mit wachsender Volumenladung die Dauer des positiven, beim Schnee die des negativen Vorzeichens ab.

Auch Schindelhauer nimmt mit Linss an, daß das Vorzeichen des Potentialgefalles am Erdboden durch das Vorzeichen der oberen Schichten bestimmt wird, weil die untersten Schichten durch die Niederschläge zur Erde geführt werden. Beim Regen ist die unterste Schicht positiv, die obere negativ, also das Potentialgefälle negativ, beim Schnee umgekehrt die untere Schicht negativ, die obere positiv, daher das Gefälle am Boden positiv. In den Wolken selbst wird das Potentialgefälle anders sein können und müssen als am Erdboden; vermutlich ist es oben umgekehrt, also bei Landregen dem normalen Gefälle gleichgerichtet. Bei Böen und Gewittern sorgen die starken Luftströmungen für eine gute Trennung der Elektrizitäten, bei Landregen fehlt das, daher bleiben hier die Ladungen gering.

In neuester Zeit hat dann noch Gschwend⁶⁷⁾ in Freiburg (Schweiz)

⁶⁷⁾ P. Gschwend, Beobachtungen über die elektrischen Ladungen einzelner Regentropfen und Schneeflocken. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 17, 62 (1920).

genaue Bestimmungen der Tropfenladungen ausgeführt. Ein großer Nachteil der den Arbeiten von Kähler, Simpson und Schindelhauer zugrunde liegenden Registrierungen ist, daß stets nur die Mittelwerte der Ladungen während eines verhältnismäßig langen Zeitraumes, 2 Minuten, aufgezeichnet werden. Während dieser Zeit kann sehr wohl ein Zeichenwechsel eintreten. Gschwend kehrte daher zu den Augenbeobachtungen zurück. Er verwandte ein empfindliches Fadenelektrometer, das er mit einer Auffangschale von nur 12 Quadratzentimeter Fläche verband. Auf dem Boden dieser Schale war Wiesner-sches Eosinpapier¹⁶⁸⁾ angebracht. Die ganze Meßvorrichtung konnte mittels eines beweglichen Deckels auf ganz kurze Zeit, 15 bis 120 Sekunden, dem Regen ausgesetzt werden. Außerdem hat Gschwend auch noch Dauermessungen ausgeführt. Die Fehlerquelle der abspritzenden Tropfen wurde dadurch vermieden, daß der Rand der oberen Schutzblende messerscharf geschnitten war, die Wasserfall- (Lenard-) Wirkung außer durch das Eosinfiltrierpapier noch dadurch, daß die Schale sich nach unten verengte. Durch diese Meßvorrichtung war Gschwend in den Stand gesetzt, Größe und Ladung einzelner Tropfen zu bestimmen. Große Tropfen ergaben auch große Ladungen: Tropfen von 10 bis 20 Milligramm Gewicht Ladungen von 5 bis 100×10^{10} elektrostatische Einheiten. Landregen, besonders wenn er aus Nebel oder tiefliegenden Wolken ruhig niederfiel, gab kleine positive Tropfen, ruhiger Schneefall hauptsächlich kleine negative Flocken, also genau wie in Potsdam. Die größeren Flocken waren in Freiburg aber positiv geladen. Im ganzen überwiegt bei Schnee wie bei Landregen das positive Zeichen, besonders bei böigem Schnee. Bei Landregen waren 80% der kleinen Tropfen positiv (Größen 0 bis 0,1 Milligramm). Die größeren Tropfen fanden sich häufiger negativ geladen. Die Spannung einzelner Tropfen schwankt bei Landregen gewöhnlich zwischen 0,5 und 10 Volt. Gschwend betont, daß schon hier die kleinen Tropfen oft eine weit größere Ladung aufweisen, als ihnen zukommen würde, wenn sie nur durch Zusammenfließen gleichartig geladener Wolken-elemente von der Größe 3×10^{-4} cm, Elementarladung $4,7 \times 10^{-10}$ entstanden wären. Der Wert Ladung : Gewicht, also die Einheitsladung, nimmt mit wachsender Tropfengröße ab, genau wie in Potsdam

¹⁶⁸⁾ Siehe Seite 124.

Bei böigem Niederschlag waren die Ladungen merklich stärker, sowie die Durchmischung der Vorzeichen größer als bei ruhigem. Der Zeichenwechsel kann dann so häufig sein, daß das Auge kaum zu folgen vermag. Der stärkste Wechsel, 8 mal in einer halben Minute, trat bei einem Böenregen mit Graupeln ein. Im ganzen ist in Freiburg wie in Potsdam das negative Vorzeichen bei Böen und Gewittern etwas häufiger als das positive. Wieder sind aber die großen Tropfen eher negativ als die kleinen. Die Spannung einzelner Tropfen ist erheblich größer als bei ruhigem Regen. Die mittlere Spannung bei Gewitterregen war z. B. 37 Volt, Höchstwert bei einigen großen Tropfen 300 Volt. Ebenso ist die Einheitsladung groß, am höchsten bei böigem Schnee (33 gegenüber 6 bei Gewitterregen). Als Höchstwerte der Einheitsladung fand Gschwend + 130 und —205, also erheblich höhere Werte als bei den Registrierungen in Simla und Potsdam erhalten wurden. Die Einheitsladung nimmt, wie in Potsdam, mit wachsender Tropfengröße ab.

Alle Augenblicksmessungen Gschwends ergaben ein Verhältnis der positiven zu den negativen Ladungen 1,55:1, die Dauerbeobachtungen ungefähr dasselbe. Die mittlere Einheitsladung betrug beim Regen + 2,7 und — 3,2, beim Schnee dagegen + 11,6 und — 8,1.

e) Die Radioaktivität der Niederschläge. Zu erwähnen ist noch, daß die Niederschläge nicht nur elektrische Ladungen tragen, sondern auch etwas radioaktiv sind, d. h. sie besitzen die Fähigkeit, um sich herum neue positive und negative Träger zu erzeugen. Frisch gefallener Regen oder Schnee, der rasch eingedampft wird, hinterläßt radioaktive Rückstände. Schnee ist wirksamer als Regen. Offenbar werden diese festen radioaktiven Bestandteile (Induktionen) von den fallenden Niederschlägen aus der Luft, in der sie ja stets vorhanden sind, mechanisch aufgenommen. Schnee erzielt mehr wegen seiner größeren Oberfläche. Natürlich spielt auch die Ladung der Niederschläge dabei eine Rolle. Da die Induktionen positive Ladung tragen, werden die negativen Niederschläge, also wieder Schnee eher als Regen, sich am leichtesten an sie lagern. Diesem an und für sich recht interessanten Vorgang kommt aber eine praktische Bedeutung kaum zu. Dazu ist die Wirkung viel zu gering.

f) Die Raumladungen der Atmosphäre. W. Thomson (Lord Kelvin) hat als erster auf die Wichtigkeit elektrischer Raumladungsmessungen in der Atmosphäre hingewiesen. Wenn dauernd positive und negative Träger in der Luft vorhanden sind, so wird in einem be-

grenzten Raum der Überschuß des einen Vorzeichens über das andere die Raumladung dieses Luftraums darstellen. Dieser Überschuß ist allein nach außen wirksam, weil sich die beiden Vorzeichen zum größten Teil gegenseitig aufheben. Wir definieren also die luftelektrische Raumladung als die Differenz der beiden in der Volumeneinheit, Kubikzentimeter oder Kubikmeter, vorhandenen Ladungen, ausgedrückt in elektrostatischen Einheiten.

Die älteste und einfachste Methode ihrer Messung rührt von W. Thomson her und beruht auf der Überlegung, daß auch in einem elektrostatisch geschützten Luftraum ein, wenn auch kleines Potentialgefälle bestehen bleiben muß, das durch die Raumladung verursacht wird und ebenso wie das natürliche Gefälle durch einen Kollektor gemessen werden kann. Einige nach dieser Methode, und zwar mittels eines Tropfkollektors in einem geerdeten Drahtnetz-Zylinder von etwa einem Kubikmeter Inhalt, von Roiti in Florenz Anfang der achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts vorgenommenen Messungen ergaben für die Spannung der Raumladung etwa den Wert + 1 Volt. Exakter, aber schwieriger und größere experimentelle Hilfsmittel erfordernd ist eine Methode, die Gockel⁶⁸⁾ bei einigen Beobachtungen in der Schweiz anwandte. Er bestimmte die Trägerdichte in einem großen Zylinder-Kondensator nach der Aspirationsmethode; dabei ergibt sich die Raumladung als die Differenz der positiven und negativen Trägerdichte.

Kahler⁶⁹⁾ hat neuerdings nach der Thomsonschen Methode in Potsdam mit Hilfe eines empfindlichen Einfaden-Elektrometers ein Jahr hindurch die Raumladung gemessen und damit ihre Schwankungen in der norddeutschen Tiefebene ungefähr festgelegt. Danach treten die höchsten Werte im Winter ein, etwa $+ 0,7 \times 10^{-6}$ elektrostatische Einheiten im Kubikzentimeter oder + 0,7 im Kubikmeter. Im Winter sind ja auch Potentialgefälle und der Überschuß der positiven über die negative Leitfähigkeit am größten. Die kleinsten Raumladungen, + 0,4, hatte der Hochsommer. Die Raumladung am Erdboden ist

⁶⁸⁾ A. Gockel, Luftelektrische Untersuchungen im Schweizer Mittelland, im Jura und in den Alpen. Neue Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft 54, 1 (1917), S. 14 u. 19.

⁶⁹⁾ K. Kahler, Über die Schwankung der elektrischen Raumladung in der Atmosphäre. Meteorol. Zeitschr. 40, 204 (1923).

Sommer wie Winter nachts und frühmorgens am höchsten, in den Stunden nach Mittag am kleinsten.

Von besonderer Wichtigkeit für die Erkenntnis der elektrischen Vorgänge in den Wolken müssen Raumladungsmessungen bei Niederschlägen sein. Schon Linss⁴⁸⁾ hat wie auf so manchen anderen Gebieten auf die Bedeutung solcher Beobachtungen hingewiesen. Außer der direkten Messung der Elektrizität der Niederschlagsteilchen sei es „unerlässlich, daß durch Abschließung eines Luftquantums in rings geschlossenen, aber luftdurchlässigen Leitern und Prüfung der elektrischen Wirkung dieses Luftquantums die elektrische Dichtigkeit der erreichbaren Luftschichten ermittelt werde“. Elster und Geitel⁵⁸⁾ nahmen 1890 den Gedanken auf. Sie führten auch schon einige Stichproben mit ihrer Meßvorrichtung für die Niederschlags Elektrizität aus und fanden zum Beispiel in diesem 4,4 Kubikmeter großen Raum bei heftigem Schneetreiben mittels eines Tropfkollektors Spannungen bis zu 150 Volt. Es ist das ein recht hoher Wert. Der Maximalwert in Potsdam in einem allerdings nur 0,6 m³ großen Meßraum betrug nur 9 Volt. Chauveau⁷⁰⁾ fand am Eiffelturm in einem 2 m³ großen Meßkäfig bei Gewittern Höchstwerte von 40 bis 50 Volt. Allerdings hält er eine Influenzwirkung des am Turm sehr starken Erdfeldes in das Innere des Käfigs hinein für möglich. Gockel erhielt einmal bei starkem Schneegestöber die Werte + und —4,0 elektrostatische Einheiten im Kubikmeter. Der oben erwähnte Potsdamer Höchstwert überschreitet, in elektrostatische Einheiten umgerechnet, etwas den Wert 5,0.

Den Zusammenhang zwischen Potentialgefälle, Niederschlags Elektrizität und Raumladung hat Kahler⁵²⁾ 69) genau untersucht. Es zeigte sich bei den Potsdamer Messungen, die sich auf 1 m Höhe über dem Erdboden beziehen, daß bei leichtem, ruhigem Regen und Landregen die Elektrizitätsverteilung fast stets die folgende ist: Das Potentialgefälle ist schwach negativ, die Regenladung umgekehrt schwach positiv. Die Raumladung folgt in ihrer Schwankung genau

⁴⁸⁾ Siehe Seite 52.

⁵⁸⁾ Siehe Seite 61.

⁷⁰⁾ A. B. Chauveau, Etude la de Variation diurne del'Electricit6atmosph6rique. Annalen des Bureau Central Meteorologique de France 1900. Paris 1902, C 103.

⁵²⁾ Siehe Seite 57.

⁶⁹⁾ Siehe Seite 69.

dem Potentialgefälle. Sie nimmt ab gegenüber dep. positiven Normalweiten und wird bei stärkerem Regen negativ, und zwar um so stärker negativ, je stärker negativ das Gefälle, je stärker positiv die Eigenladung des Regens ist. Das Auffallendste bei diesem Verhalten ist, daß ein Überdachen des Meßkäfigs die im Innern gemessenen Werte der Raumladung fast gar nicht beeinflußt. Daraus geht hervor, daß die positiv geladenen Regentropfen auf die Raumladung überhaupt nicht einwirken. Vielmehr verdankt die Raumladung und mit ihr das Potentialgefälle das negative Vorzeichen leichtbeweglichen negativen Ladungen, die ungehindert, mit dem Wind von der Seite in den Käfig gelangen. Also schon bei ruhigem Regen findet eine klare Trennung der beiden Elektrizitäten statt, wobei die positive Ladung an den großen Tropfen, die negative an feinen Tröpfchen haftet. Beide Elektrizitäten gelangen beim Regnen der Wolke bis zum Boden, die positiven aber offenbar leichter und eher, so daß in der Luft über dem Boden und vermutlich erst recht in der Wolke selber ein negativer Ladungsüberschuß zurückbleibt, der das normale Potentialgefälle umkehrt. Es liegt anfangs nahe, die Erklärung in der Wasserfall-(Lenard-)Wirkung des Regens auf dem Erdboden zu suchen, der ebenfalls positive Tropfenladungen und negativen Wasserstaub erzeugen würde. Doch führt eine solche Vorstellung zu Widersprüchen. Die Messungen der Niederschlagselektrizität, vor allem die von Weiß und Gschwend, beweisen, daß die positiven Ladungen der Regentropfen nicht erst am Boden entstehen, sondern ihnen schon beim Fallen anhaften. Ferner ist nicht einzusehen, wie die beim Aufprallen durch die Lenardwirkung am Boden entstehenden feinen negativen Ladungen gegen den fallenden Regen in die Höhe transportiert werden können, um die in der Raumladung und beim Potentialgefälle gefundenen negativen Werte hervorzurufen. Man kann also das negative Potentialgefälle bei Regen nicht durch die Aufprallwirkung der Regentropfen erklären.

Nun kommt es bekanntlich vor, daß selbst bei ruhigem Regen das Potentialgefälle von negativen zu hohen positiven Werten übergeht. Dann gibt meistens auch sofort die Raumladung höhere positive Werte, während sich das Vorzeichen der Regenladung ebenfalls umkehrt, also statt positiv negativ wird. Hier versagt die Aufprallwirkung am Boden ganz. Offenbar kehrt sich jetzt aus irgendeinem Grunde der elektrische Prozeß in den Wolken um, so daß auch die Elektrizitätsverteilung sich umkehrt und alle drei Elemente gleichzeitig ihr Vor-

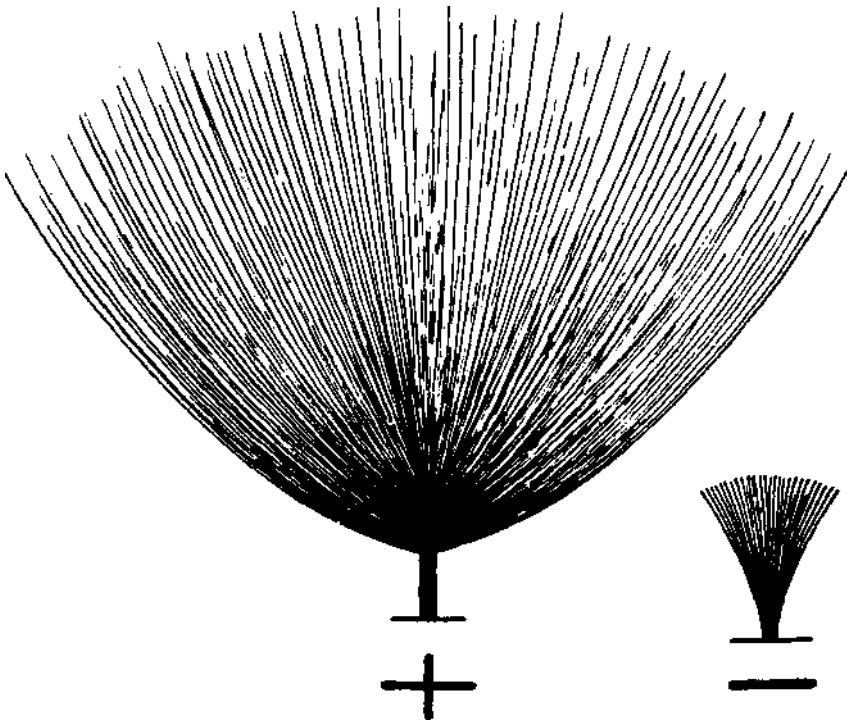
zeichen wechseln müssen. Diese bei Regen seltene Elektrizitätsverteilung ist bei ruhigem Schneefall die Regel. Dann sind also Potentialgefälle und Raumladung meistens positiv, während die Schneeflocken selber negative Ladungen tragen. Auch hier ist ein Überdachen des Meßkäfigs ohne Einfluß. In diesem Fall müssen also die positiven Ladungen an den kleinen Nebeltröpfchen haften, die von der Seite in den Meßraum dringen.

Bei Regenschauern und kleineren Böen sind die Zusammenhänge oft noch ähnlich. Ganz unübersichtlich werden sie aber mitten in starken Böen und Gewittern. Nur beim Herausziehen der Bö, in ihrer Frontwirkung, beim Abziehen, sowie in den Regenpausen bei längeren Niederschlägen findet sich noch meistens der alte Zusammenhang. Es lagert dann eine stark elektrische Luftmasse über dem Erdboden, die, wenn sie einigermaßen ausgedehnt ist, auf Potentialgefälle und Raumladung gleichartig wirkt. Wenn aber schon auf kurze Entfernung diese Ladung sich ändert, und das ist mitten in der Bö und im Gewitter die Regel, dann weichen auch Potentialgefälle und die Raumladung eines kleinen Luftraums oft stark voneinander ab. Hier kann auch stark elektrischer Niederschlag die Raumladung und damit das Potentialgefälle beeinflussen. Es kann beispielsweise vorkommen, daß 10 Minuten lang alle drei Elemente sehr hohe positive Werte zeigen. Unter solchen Umständen treten die höchsten Werte der Raumladung ein, die wohl dadurch zu erklären sind, daß alle Tröpfchen, große wie kleine, dieselbe Ladung tragen. Wenn Potentialgefälle und Raumladung abweichen, so zeigt, wie Potsdamer Parallelbeobachtungen beweisen, auch das Potentialgefälle selbst schon auf kurze Entfernung (100 m) Abweichungen. Bei noch größerem Abstand zweier Gefälle-Meßstellen kann, wie Kahler⁷¹⁾ bereits 1909 feststellte, eine zwischen beiden hindurchziehende Bö große Abweichungen zeitigen, beispielsweise auf die eine Station eine starke positive, auf die andere eine starke negative Frontwirkung ausüben. In Richtung der Böenfortpflanzung bleibt dagegen die Elektrizitätsverteilung einige Zeit dieselbe. Aus all diesen Messungen geht hervor, daß die Raum- und Wolkenladung in Böen und Gewittern schon auf kurze Entfernung stark wechseln kann.

⁷¹⁾ K. Kähler, Über die Wirkung von Regenfällen und Böen auf das Potentialgefälle am Erdboden. Aus Registrierungen an drei benachbarten Stationen. Bericht über die Tätigkeit des Preußischen Meteorologischen Instituts im Jahre 1908. S. (67). Auszug Meteorol. Zeitschr. 27, 368 (1910).

4. Das Elmsfeuer

Die höchsten Potentialgefällewerte am Erdboden übersehreiten etwas den Wert 10000 Volt/m. Bei diesen großen Feldstärken erstrecken sich nun die elektrischen Kräfte nicht mehr allein auf die im Raum befindlichen Elektrizitätsträger, sondern sie beginnen jetzt auch in das Innere der Luftmoleküle zu wirken. Aus einem



Figur 7
Künstliche Büschelentladungen (nach v. Obermayer)

Molekül tritt, wie das zuerst Lenard bei den Kathodenstrahlen nachgewiesen hat, beim Zusammenstoß mit einem anderen ein negatives Elementarquantum, also ein Kathodenstrahl aus, so daß das Molekül positiv geladen zurückbleibt. Das freie negative Quant vereinigt sich ebenfalls mit einem Luftmolekül. Auf diese Weise werden dauernd neue Elektrizitätsträger erzeugt. Vielfach ist dieser Vorgang mit Lichterscheinungen verbunden, die durch das Leuchten der Gas-moleküle entstehen.

Im elektrischen Kraftfeld der Erde treten solche Lichterscheinungen gar nicht so selten auf, jedenfalls viel häufiger als der Stadtbewohner annimmt. Sie sind auch schon seit den ältesten Zeiten bekannt. So berichtet schon Plinius von Sternen, die sich auf die Speere der römischen Soldaten und auf die Segelstangen der Schiffe setzten und die unter eigentümlichen Geräuschen wie Vögel von einem Orte zum anderen hüpfen, die jedoch, wenn sie einzeln kamen, die Schiffe in den Grund bohrten. Von den Seeleuten soll auch der Name für diese Erscheinungen herrühren. Das Dioskurenpaar Kastor und Pollux galt den Alten, wie auch noch den Seefahrern des Mittelalters als Retter in der Not. Da schwache Lichterscheinungen an den Masten während eines Unwetters als günstiges Zeichen für ein baldiges gutes Ende gedeutet wurden, wurden sie nach ihnen genannt. Dagegen galten einzelne Lichterscheinungen als ungünstiges Zeichen. Diese wurden Stern der Helena, Helena war die Schwester der Dioskuren, genannt. Daraus soll der Name Helenasfeuer, Elmis oder Elmsfeuer entstanden sein. Eine andere Deutung des Namens führt ihn auf St. Erasmus, italienisch St. Ermo oder St. Elmo, zurück, an dessen Kirchen die Erscheinung in Italien im frühen Mittelalter vor allem beobachtet worden ist. Jedenfalls ist die Bezeichnung St. Elms- oder Elmsfeuer jetzt allgemein für diese und verwandte Erscheinungen üblich.

Physikalisch gesprochen, handelt es sich, wie M. Töpler⁷²⁾ hervorhebt, um dauernde Glimm-, zum Teil auch Büschelentladungen mit nur einer Elektrode, nämlich der Erde. Die zweite Elektrode liegt verhältnismäßig weit entfernt in der Wolke oder doch in den Luftschichten an und neben den Niederschlägen. Solche kontinuierlichen Glimm- und Büschelentladungen sind im Gegensatz zu den Büschellichtbogen und Flammenbogen meistens schwach. Sie sind daher am Tage selten und auch in der Nacht nur bei großen Stromstärken sichtbar. Schon längere Zeit vor Töpler hat v. Obermayer⁷³⁾ Laboratoriumsversuche

⁷²⁾ M. Töpler, Über die Abhängigkeit des Charakters elektrischer Dauerentladungen in atmosphärischer Luft von der dem Entladungsraume kontinuierlich zugeführten Elektrizitätsmenge, nebst einem Anhang zur Kenntnis der Kugelblitze. *Annalen der Physik*, 4. Folge, 2, 560 (1900).

⁷³⁾ A. v. Obermayer und M. Ritter von Pichler, Über die Entladung hochgespannter Elektrizität aus Spitzen. *Wiener Sitzungsberichte* IIa, 93, (1886) und A. v. Obermayer, Versuche über die Elmsfeuer genannte Entladungsform der Elektrizität. *Wiener Berichte* 97, 147 (1888).

zum Klären der Erscheinung angestellt. Um an den Fingern von Versuchspersonen Büschel von einem Zentimeter Länge zu erhalten, waren in einer Influenzmaschine Spannungsunterschiede von 2000 bis 10000 Volt pro Zentimeter nötig, je nachdem, ob der Finger 30 oder 2 cm von der als Elektrode dienenden Platte entfernt war. Auf Grund weiterer Versuche unterscheidet Obermayer⁷⁴⁾ zwischen positiven und negativen Entladungen (s. Figur 7). Die Büschel mit positiver Elektrode haben einen deutlichen rötlich-weißen Stiel. Die Verzweigungen darüber sind ausgesprochen feinstrahlig und gegen die Enden violett. Der Kegel, den die Strahlen dieses Büschels bilden, hat einen Öffnungswinkel größer als ein rechter Winkel. Die einzelnen Strahlen sind 1,5 bis 3 und selbst bis zu 5 und 6 cm lang. Die negativen Büschel dagegen sitzen nicht an einem Stiele, sondern nur an einem Lichtpunkt auf und sind so zarter Struktur, daß einzelne Strahlen nicht unterschieden werden können. Der Lichtpunkt ist vielmehr von einer zarten Lichthülle umgeben, die sich wie ein Blütenkelch zum Büschel erweitert. Die Öffnung des Büschels ist viel kleiner als 90°, meistens nur etwas über 45°; die Länge des Büschels bleibt stets unter 1 cm. Die Versuche v. Obermayers zeigten ferner, daß die positiven Ausstrahlungen z. B. aus den Kleidern aus geradlinigen Lichtfäden bestehen, die dicht nebeneinander sitzen wie die Haare eines Pelzes. Die negativen Ausstrahlungen bestehen dagegen aus einem einzelnen unruhigen Phosphoreszieren, das stellenweise durch dunkle Flecken unterbrochen ist. Nach v. Obermayer ist es durchaus möglich, daß fallender Schnee oder Eisnadeln leuchtend werden, ebenso wie die elektrische Büschelentladung aus Spitzen häufig mit einem Glimmen der ihnen gegenüber befindlichen, entgegengesetzt elektrischen Körpern verbunden ist.

Vorzeichenbestimmungen des St. Elmsfeuers sind von Elster und Geitel⁷⁵⁾ und nach ihrer Anweisung von dem Beobachter Lechner auf dem Sonnblick (3100 m) einige Jahre hindurch ausgeführt worden. Gerade der Sonnblick war dafür sehr geeignet, weil bei dem kleinen

⁷⁴⁾ A. v. Obermayer, Über die bei Beschreibung von Elmsfeuer notwendigen Angaben. Meteorol. Zeitschr. 5, 324 (1888).

⁷⁵⁾ J. Elster und H. Geitel, Elektrische Beobachtungen auf dem Hohen Sonnblick. § 4 Elmsfeuer. Wiener Sitzungsberichte IIa, 99, November 1890. - Elmsfeuerbeobachtungen auf dem Sonnblick. Wiener Berichte 101, 1485 (1892). Nachtrag 104, 42 (1895). Auszug Meteorol. Zeitschr. 10, 119 (1893).

Luftdruck und dem oben herrschenden ziemlich starken Felde die elektrischen Entladungen dort sehr begünstigt werden. Trabert¹³⁾ hat sehr anschaulich die im Gefolge von Gewittern dort fast immer auftretenden Elmsfeuererscheinungen beschrieben. Alle Gegenstände leuchten hell, so die Felsenspitzen, die Blitzableiter, die eisernen Verankerungen des Beobachterhauses, das Schalenkreuz des Windmessers usf. Am Menschen leuchten Kopfhaar und Bart, der Hut, die Finger, sowie der in der Hand gehaltene Bergstock, oft in 8 bis 10 cm hohen Flämmchen, die auf einem etwa 7 mm langen Stiele sitzen, also offenbar positive Entladungen darstellen. Das Leuchten des Haares erweckt einen förmlichen Heiligenschein, der einige Zentimeter breit ist und um so besser leuchtet, je feuchter das Haar ist. Neben den Lichterscheinungen gehen recht starke Geräusche einher, die Blitzableiter sausen so laut, daß es selbst im Zimmer hörbar ist; die Bergstöcke summen usf. Während desselben Gewitters treten positive und negative Elmsfeuer auf. Vor allem nach einem Blitz tritt häufig ein Zeichenwechsel ein. Dabei verschwinden die Flämmchen, als wenn sie abgeschnitten worden wären. Das positive Elmsfeuer sah Trabert meistens rot, das negative intensiv blau. Elster und Geitel benutzten, da die von v. Obermayer empfohlene Methode am Tage im Stich läßt, zur Bestimmung des Vorzeichens ein Bohnebergersches Elektroskop. Sobald sich das charakteristische Rauschen an den Blitzableitern und Stangen einstellte, wurde ein etwa 20 cm breiter, kreisrunder Elektrophordeckel so in das geöffnete Fenster gehalten, daß seine Vorderfläche mit der Fensterebene abschloß. Alsdann wurde der Deckel einen Augenblick geerdet und mit dem Knopf des Elektroskops in Berührung gebracht. So besitzt der in das Zimmer genommene Deckel stets eine der ausströmenden Elektrizität gleichnamige Ladung. Hielt man während eines heftigen Elmsfeuers den Deckel etwa auf Armeslänge zum Fenster hinaus, so ließen sich aus ihm nach der Ableitung kleine Funken von 2 bis 3 mm Länge ziehen. Elmsfeuer von stundenlanger Dauer wurde während Schneetreibens beobachtet, während gleichzeitig im Tale Gewitter niedergingen. Dabei war das Potentialgefälle auf dem Sonnblick negativ, das Elmsfeuer positiv. Beide Elemente verhalten sich also, wie zu erwarten war, spiegelbildlich. Bei einem anderen Schneefall wechselten beide in der Stunde dreimal

¹³⁾ Siehe Seit} 17.

ihr Vorzeichen. Die Trabertsehe Beobachtung über die Farbe des Elmsfeuers wird von Elster und Geitel bestätigt. Sie hatten dabei den Eindruck, daß die dabei auftretenden Blitze in die Felsen trafen. Es scheint also, als ob es auf die Färbung der Entladung von Einfluß ist, ob die Erde Anode oder Kathode ist. Laboratoriumsversuche, bei denen eine schlecht leitende Wasserfläche einer Metallspitze gegenüberstand, ergaben ebenfalls eine rötliche Färbung, wenn die Spitze Kathode, eine bläuliche, wenn sie Anode war.

Nun sind aber die Elmsfeuer durchaus nicht immer an die Gewitter gebunden. Selbst im Winter ist auf dem Sonnblick während schwachen Schneefalls mehrfach langdauerndes Elmsfeuer beobachtet worden; doch tritt es fast stets nur bei Niederschlägen oder doch vor und nach den Niederschlägen auf, und zwar sowohl bei Sturm als bei Windstille. Bei heiterem Himmel tritt es nie auf, offenbar, weil dann das Potentialgefälle zu klein bleibt und die zum Ausströmen der Elektrizität nötige Stromdichte nicht erreicht wird. An Tagen nicht gewitterigen Charakters hat das Elmsfeuer häufig keinen Vorzeichenwechsel. So tritt es bei ruhigem Schnee auf dem Sonnblick fast regelmäßig mit positivem Zeichen auf, solange der Schnee große Flocken bildet. Feinkörniger oder staubiger Schnee, wie er im Winter die Regel ist, gibt dagegen häufiger negative Elmsfeuer. Elster und Geitel deuten das als eine Bestätigung ihrer Tieflanderfahrung, wo sie bei großen Flocken eher negatives, bei feinkörnigem Schnee eher positives Potentialgefälle feststellten. Bei Hagel trat auf dem Sonnblick öfter starkes positives Ausströmen ein. Bei böigem und gewitterigem Niederschlag kann der Zeichenwechsel in kurzen Zeiträumen folgen. Das ist gleichbedeutend mit der Erfahrung, daß dann das Potentialgefälle stark im Vorzeichen schwankt. Es tritt also bei solchen Vorgängen deutlich ein Wechsel der Elektroden ein. Eine Statistik des gesamten Sonnblickmaterials ergibt, daß Lechner während dreier Jahre insgesamt 55 Elmsfeuer gesehen hat; die meisten im August, Oktober und März, die wenigsten im Dezember und Januar. Dem Vorzeichen nach überwog bei den selteneren Winterbeobachtungen zu neun Zehnteln das negative, in der übrigen Zeit etwas das positive.

Von anderen Beobachtungen des St. Elmsfeuers auf Bergen seien noch folgende erwähnt: Prohaska⁷⁶⁾ sah auf dem Schafberge im Salz-

⁷⁶⁾ K. Prohaska, Elmsfeuer am Schafberg. Meteorol. Zeitschr. 10,222 (1893).

kammergut meistens blaßblaue, birnenförmige Flämmchen, die ruhig leuchteten und nur bei Blitzen verschwanden und wieder er schienen. Prohaska beobachtete das Elmsfeuer auch im Innern eines Hauses, z. B. an den Treppentiegen. Von Elmsfeuerbeobachtungen auf dem Brocken finden sich in der Literatur zwei Beschreibungen von Stade⁷⁷⁾, beide Male bei starkem Nebel und graupelartigem Schnee. Das eine Mal trat nach den Richtlinien von v; Obermayer zuerst positives, dann negatives Ausströmen auf. Das negative wies aber größere Strahlen auf, als Obermayer angibt, nämlich weißlich-violette Büschel von 2—3 cm mit einem Öffnungswinkel von 45°. Weiter ist ein Elmsfeuer auf dem Brocken vom Januar 1902 beschrieben worden⁷⁸⁾; dabei traten bei einem Gemisch von Schnee und Regen 1¹/₂ bis 2¹/₂ cm lange violette Lichtbüschel mit hellem Stiel auf, also positives Ausströmen, aber mit einem Öffnungswinkel viel kleiner als 90°. Am selben Tage wurde auch auf der Schneekoppe vom Beobachter Schwarz Elmsfeuer gesehen, das während Graupel- und Schneeschauern als hellblaues, ruhiges Licht von Haselnußgröße und -form auftrat. Im März 1902 wurden ebendort bei schwachem Schnee und starken Westwinden 4 cm lange, ruhige, bläulich-weiße Büschel beobachtet, die ebenfalls Öffnungswinkel kleiner als 90° aufwiesen. Im April 1902 sah Schwarz⁷⁹⁾ bei dichtem Nebel und Schnee und Graupeln am Rauhreif bläuliche Flämmchen, die zischten, und Büschel von 2½ bis 3 cm Länge. Diese Büschel hüpfen und tanzen, wobei der Stecknadelkopfartige Stiel (Kopf nach oben) bis zu 10 mm, die Büschel selbst bis zu 10 cm Länge anwachsen. Die Öffnungswinkel lagen meistens bei 65 bis 70°, nur bei den größeren Büscheln erreichten sie 90°. Die Färbung des Stiels war violett, die der Büschel aber rötlich. Schließlich wurde noch im November 1903 auf der Koppe bei Schnee und Sturm 4 Stunden lang ein Elmsfeuer beobachtet. Zuerst traten Lichtpunkte auf, dann unter Zischen Büschel mit 4 bis 5 mm langem Stiel, aber nur mit einem Öffnungswinkel von 45°. In den Jahren 1913 bis 1915 wurden, wie aus den „Ergebnissen der Gewitterbeobachtungen in den Jahren 1913 bis 1915“ (Berlin 1918) zu entnehmen ist, zehnmal

⁷⁷⁾ H. Stade, St. Elmsfeuer auf dem Brocken. Meteorol. Zeitschr. 15, 236 (1898).

⁷⁸⁾ St. Elmsfeuer am 2. Januar 1902. Das Wetter 19, 20 (1902).

⁷⁹⁾ L. Schwarz, St. Elmsfeuer auf der Schneekoppe, Meteorol. Zeitschr. 19, 289 (1902).

Elmsfeuer auf der Schneekoppe beobachtet, meist bei Sommergewittern, im September 1914 bis zu 15 cm lange Büschel.

Aus diesen Bergbeobachtungen geht also wohl hervor, daß in der Atmosphäre die Trennung bei den positiven und negativen Büscheln nach Größe und Aussehen nicht so ausgeprägt und scharf begrenzt ist, wie bei den Laboratoriumsversuchen von v. Obermayer.

Außer im Gebirge wird bekanntlich das Elmsfeuer am häufigsten auf See beobachtet. Wie Haltermann⁸⁰⁾ hervorhebt, hat es für den Seemann nichts Auffälliges, wenn es auch in dunklen Regen- und Sturmnächten als bleiche, zitternde Flämmchen einen unheimlichen Eindruck hervorruft. Von 156 Beobachtungen auf Segelschiffen, die der Deutschen See warte in den Jahren 1884 und 1885 zuzogen, traten nur 6 ohne Niederschlag auf. Bei 27 wurde kein Blitz oder Donner bemerkt. Am stärksten ist das Elmsfeuer bei Schnee- und Hagelschauern. Im Atlantischen Ozean entfielen 47 Meldungen auf die Zeit Oktober bis April und nur 14 auf Mai bis September. Am häufigsten war es im Gebiet nördlich 30° n. Br., wo Koppen⁴⁾ später die meisten Gewitterböen feststellte. Aus dem Gebiet des Passats lagen überhaupt keine Elmsfeuer-Meldungen vor.

Es unterliegt wohl keinem Zweifel, daß auch im Tiefland das Elmsfeuer nicht so sehr selten ist. Außer den Beobachtern fehlen aber meistens die überragenden Gegenstände, an denen sie sich am ehesten bemerkbar machen. Arendt⁸¹⁾ erwähnt, daß an einer hochgelegenen Windmühle in Klausthal (Harz) in 36 Jahren 40 mal Elmsfeuer gesehen wurde, am häufigsten im November und in den anderen Wintermonaten, selten im Sommer. Arendt selbst hat am Potsdamer Observatorium 2 mal Elmsfeuer beobachtet, wo es sich in Form eines Flammenringes am Schalenkreuz des Windmessers zeigte.

Daß Elmsfeuer bei Ballonfahrten beobachtet worden ist, so z. B. in Schnee wölken als ein Meer von kleinen Lichtern am Ballonkorb, wird nicht wundernehmen. Schwieriger zu deuten sind Beobachtungen von Glimmentladungen an Wolken, vor allem an den Wolkenrändern⁸²⁾.

⁸⁰⁾ H. Haltermann, Über St. Elmsfeuer auf See. Meteorol. Zeitschr. 7, 73 (1890). Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie 24, 269 (1896).

⁴⁾ Siehe Seite 12.

⁸¹⁾ Th. Arendt, Das St. Elmsfeuer. Das Wetter 15, 2 (1898).

⁸²⁾ R. Süring, Glimmentladungen an Wolkenrändern. Meteorol. Zeitschr. 29, 389 (1912).

Hierher gehört auch eine ebenfalls von Süring⁸³⁾ veröffentlichte Lichterscheinung, die in Form von etwa 1 cm großen Kugelchen während eines Abendgewitters an Bäumen auftrat und die Süring als elmsfeuerartige Entladungen zwischen den Regentropfen und den Bäumen erklärt.

Zu den elmsfeuerartigen Entladungen sind auch die elektrischen Lichterscheinungen zu zählen, die vor allem in den Hochgebirgen der Tropen und Subtropen auftreten. Schon in der älteren Literatur finden sich Hinweise darauf. So können im nordamerikanischen Felsengebirge ganz enorme elektrische Ausströmungen und Ausstrahlungen sich bilden. Ebenso ist seit langem das Leuchten der südamerikanischen Anden bekannt. Es wurde allerdings von früheren Beobachtern vielfach mit vulkanischen Vorgängen in Zusammenhang gebracht. Nach den von Goll⁸⁴⁾ zusammengetragenen Beobachtungen ist es jedoch nicht zweifelhaft, daß „stille“ elektrische Entladungen, die sich aber auch in mächtigen Elmsfeuern und Funkensprühen äußern können, hier in großartigem Maßstabe ausgebildet sind und die Anden gewissermaßen zu einem gewaltigen Blitzableiter für Chile machen. In letzter Zeit hat Knoche⁸⁵⁾ schöne Beschreibungen dieser Erscheinung gebracht. Das Leuchten tritt auf als ein bandartiges Zucken von weißlicher Färbung mit einem Stich ins Rötliche. Über dem Gebirge erscheint das Leuchten sogar zenithal als weißliche Fläche. In 5000 m Höhe sah er stille Glimmentladungen von gewaltiger Stärke und Dauer, oft gleichzeitig über hunderte von Kilometern hin. Es ist nicht zu verwechseln mit Wetterleuchten, das meistens nur kurze Zeit dauert. An einzelnen Stellen kann es zu heftigen Ausströmungen kommen. So sah Knoche aus den Felskuppen Funkenausbrüche von mehreren Metern Länge bei sternklarem Himmel. Die stillen Entladungen legen sich bisweilen als eine flache Schicht um eine Kuppe, bisweilen umgeben

⁸³⁾ E. Layer, Elektrische Lichterscheinungen an Bäumen. Meteorol. Zeitschr. 85, 94 (1918).

⁸⁴⁾ F. Goll, Elektrische Erscheinungen in den südamerikanischen Anden. Meteorol. Zeitschr. 23, 35 (1906).

⁸⁵⁾ W. Knoche, Eine Beobachtung des Andenleuchtens der Anden zu Valparaiso. Meteorol. Zeitschr. 26, 83 (1909). — Über elektrische Entladungen in der Kordillere. Meteorol. Zeitschr. 26, 355 (1909). — Einige Beobachtungen der stillen Entladungen in der Kordillere in Coya-Station. Meteorol. Zeitschr. 29, 329 (1912). — Irrende Entladungen. Meteorol. Zeitschr. 31, 300 (1914). — Auffallende stille Entladungen während eines Gewitters in Valparaiso. Meteorol. Zeitschr. 32, 481 (1915).

sie die Berge als ein Strahlenkranz von zwei Stockwerken. Bei einem Gewitter in Valparaiso beobachtete Knoch 10 Minuten lang sehr starke, stille Entladungen über allen Hügeln rings um die Stadt. Es war ein weißlich-blaues Licht von so starkem Glänze, daß ein dauerndes Hineinsehen unmöglich war. Als „irrende“ Entladungen bezeichnet Knoch eine Erscheinung, die als schwacher, weißlicher Lichtschein am wolkenlosen und mondscheinlosen Nachthimmel hin- und herbewegend auftritt und vom eigentlichen Andenleuchten deutlich verschieden ist.

Vereinzelt liegen Beobachtungen der stillen Entladungen auch für die Ebene vor, beispielsweise von Nippoldt⁸⁶⁾ in Potsdam. Bemerkenswert war auch hier die vollkommene Abwesenheit von Geräuschen. Die Leuchtkraft war so groß, wie sie sonst nur ein Blitz hervorruft.

5. Der Linienblitz

Das Verdienst Franklins um die Blitzerforschung ist unstreitig groß. In Deutschland war es vor allem der Hamburger Reimar, der sehr zur Klärung des Blitzvorganges beitrug. (1778 in seiner Arbeit „Vom Blitze“ zusammengefaßt.) Es hat aber dann fast hundert Jahre gedauert, bis man tiefer in das Wesen des Blitzes eindrang. Es wurde zwar erkannt, daß er kein Augenblicksvorgang ist, sondern eine mehr oder weniger lange Zeit dauernde Strömung der Elektrizität durch die Luft darstellt. Genaueren Einblick gewann man aber erst durch Blitzphotographien. Die erste solche Aufnahme rührt vermutlich her von dem Photographen Hänsel 1883 in Reichenberg (Böhmen). Bald darauf glückte Kayser⁸⁷⁾ die Photographie eines schönen Blitzes, bei dem es durch einen günstigen Umstand möglich war, die zeitlich aufeinander folgenden Phasen des Blitzes zu erkennen. Der Hauptstrahl bestand nicht aus einer Linie, sondern aus vier dicht nebeneinander liegenden. Der Blitz hatte also vier Teilentladungen, die alle denselben Weg durch die Luft nahmen und nur dadurch sichtbar wurden, daß der Wind die Luft seitlich verschob.

⁸⁶⁾ A. Nippoldt, Beobachtungen zweier „Stiller Entladungen“. Meteorol. Zeitschr. 33, 138 (1916).

⁸⁷⁾ E. Kayser, Über Blitzphotographien. Berliner Sitzungsberichte 48, 1119 (1884) und Wiedemanns Annalen der Physik 25, 131 (1885).

Der Blitz ging 350 m von der fest aufgestellten photographischen Kammer nieder. Die Abstände der vier Entladungen betrugen daher, aus der Platte berechnet, 1,4, 0,4 und 0,6 m, der Zeitraum zwischen ihnen 0,36, 0,04 und 0,07 Sekunden. Eine bemerkenswerte Erscheinung der Kayserschen und einiger späterer ähnlicher Aufnahmen ist nach Walter die Schichtenbildung in der Blitzbahn, die sich vielleicht durch die Wärmewirkung und die dadurch hervorgerufene Luftverdünnung erklärt. Die Kaysersche Aufnahme ergibt eine Breite dieser Schichtung von 35 cm. Später hat man mittels feststehender Kammern Blitze erhalten, die noch mehr Entladungen nebeneinander zeigten, so Wenger⁸⁸⁾ einen 9fachen, Kennelly⁸⁹⁾ sogar einen 14fachen Linienblitz. Für die 14 Teilentladungen dieses Blitzes ergab sich eine ungefähre Breite der Blitzbahn oben an der Wolke zu 7,5, unten zu 3 m.

L. Weber⁹⁰⁾ hat ein sehr einfaches Mittel angegeben, wie man diese zeitlichen Änderungen des Blitzes, die bei den oben erwähnten Aufnahmen nur durch Zufall sichtbar wurden, räumlich nebeneinander auf die Platte bringt, nämlich dadurch, daß man der Kammer eine bekannte Bewegung gibt. Weber führte das bei einer kleinen Handkammer so durch, daß er ihr eine „schaukelnd-oszillatorische“ Bewegung gab, so daß die Achse des Objektivs einen elliptischen Kegelmantel beschrieb. Feste und dauernd beleuchtete Punkte zeichnen dadurch eine ovale Figur, welcher von Weber durch langsame Bewegung eine spiralförmige Form gegeben wurde. Auf diese Weise nahm er zwei Blitze auf, von denen der eine wagerecht, der zweite senkrecht verlief. Beide hatten eine Zeitdauer von über einer halben Sekunde. Während dieser Zeit fand beim ersten Blitz keine merkliche Unterbrechung oder Intensitätsänderung statt, der zweite zeigte aber vier ziemlich plötzlich auftretende Stärkeschwankungen. Diese sind keineswegs alternierende Entladungen, vielmehr verstärkte Entladungen in derselben Richtung. Die bei beiden Webersehen Blitzen auftretenden Querstreifen erklären sich durch verstärkte Helligkeit derjenigen Punkte der Blitzbahn, die perspektivisch verkürzt erscheinen.

⁸⁸⁾ R. Wenger, Ein neunfacher Linienblitz. Meteorol. Zeitschr. 33, 544 (1916).

⁸⁹⁾ A. E. Kennelly, Ein vielfacher Blitzstrahl. Meteorol. Zeitschr. 17, 558 (1900).

⁹⁰⁾ L. Weber, Über Blitzphotographien. Berliner Sitzungsberichte 38, 781 (1889).

Bei der drehenden Bewegung der Kammer zwischen den Händen ist es nun aber für die Klarheit des Bildes nicht förderlich, daß die aufeinander folgenden Punkte der Teilentladungen statt auf einer geraden auf einer krummen Linie liegen. Auch die Zeitmessung ist dadurch sehr erschwert. Deswegen hat Walter⁹¹⁾ die Kamera auf ein Uhrwerk gesetzt, das sich langsam um eine feste Achse dreht. Eine einfache Betrachtung zeigt, daß dann der zeitliche Abstand dt zweier durch dieselbe Bahn erfolgenden Teilentladungen sich aus der auf der Platte senkrecht zur Drehungsrichtung gemessenen Entfernung y zweier korrespondierender Punkte durch die Formel berechnen läßt

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

wobei f die Brennweite des Objektivs, w die Winkelgeschwindigkeit der Kammer und y der Abstand der fraglichen Stelle der Platte von ihrer zur Drehungsachse parallelen Mittellinie bedeutet. Bei Aufnahmen Walters im Sommer 1902 drehte sich die Kammer in 18 Sekunden einmal um sich selbst. Diese Geschwindigkeit reicht für entferntere Blitze aus. Wichtig ist ferner, daß bei der Vorrichtung die Kammer leicht zurückgedreht werden kann, damit während des Gewitters kein Augenblick verloren geht. Auf diese Weise hat Walter bei einem Nachtgewitter aus einer langsam über Hamburg ziehenden Gewitterwolke in einer halben Stunde 16 Blitzbilder erhalten.

Um diese Bilder leichter deuten zu können, hat Walter, wie schon vor ihm Töpler, Laboratoriumsversuche ausgeführt. Er ließ in einem Induktionsapparat ohne Kondensator Funken übergehen zwischen zwei senkrecht übereinander stehenden zugespitzten Platindrähten und photographierte die Funkenstrecke auf horizontal bewegten Platten. Aus den Bildern sieht man sofort, daß der Funke nicht mit einem Schlage fertig geworden ist, sondern daß ihm sein Weg erst durch mehrere stoßweise aufeinander folgende, von Stoß zu Stoß immer länger werdende Vorentladungen gebahnt wurde. Diese Vorentladungen sind sozusagen Tastversuche der Elektrizität, um sich den günstigsten

⁹¹⁾ B. Walter, Über die Entstehungsweise des Blitzes. Aus dem Jahrbuch der Hamburgischen Wissenschaftlichen Anstalten 20, (1903). — Ein photographischer Apparat zur genaueren Analyse des Blitzes. Physikal. Zeitschr. 3, 168 (1902). Meteorol. Zeitschr. 19, 335 (1902). — Einige weitere Bemerkungen über Blitze und photographische Blitzaufnahmen. Annalen der Physik, 4. Folge 19, 1032 (1906);

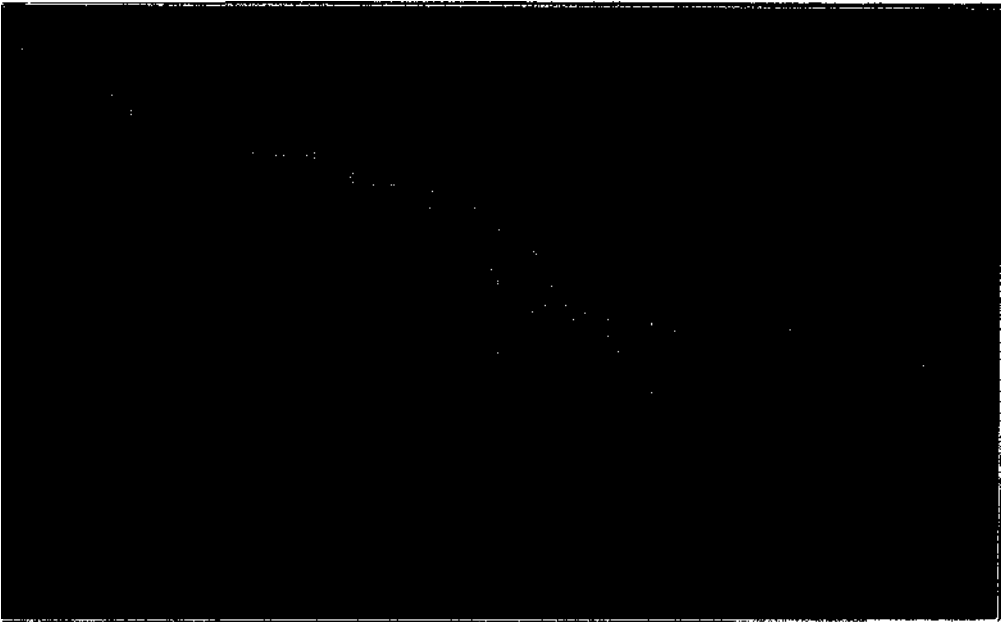
Weg durch die Luft zu bahnen. Dabei gehen die Entladungen immer gleichzeitig vom positiven und negativen Pol aus; doch sind häufig die Vorentladungen der positiven Seite ganz erheblich länger und zugleich viel mehr verästelt als die negativen. Der positiven Elektrizität kommt also bei weitem das Hauptverdienst an dem Zustandekommen der Funkenbahn zu. Der eigentliche Funke weicht dann nur in Einzelheiten von der Bahn der letzten Vorentladung ab. Die Luftteilchen scheinen also eine Zeitlang ihre größere Leitfähigkeit beizubehalten. Diese große Leitfähigkeit macht sich oft auf den Bildern als eine Art wolkenartiges Leuchten bemerkbar, vor allem zwischen letzter Vor- und Hauptentladung. Hinter der Hauptentladung ist häufig noch eine Nachentladung zu erkennen, die oft die Form einer Aureole annimmt. Die Stromverzweigungen der Hauptentladung, sowie die vielen Seitenäste sind ebenfalls durch sehr schnelle Büschelung der Elektrizität zu erklären. Oft sind auf den Bildern geradezu Gabelungen des Stromes zu erkennen; auf gleiche Weise entstehen die häufigen Verbreiterungen der Funkenbahn.

Diese Laboratoriums versuche wandte Walter nun auf seine Blitzphotographien an. Der erste der 16 Blitze, der in der Figur 8 wiedergegeben ist, hatte drei Teilentladungen von der Wolke aus, die zusammen weniger als eine zehntel Sekunde dauerten. Die erste Teilentladung gelangt gar nicht zur Erde, sondern löst sich in Büschelentladungen auf; erst die zweite bilde die Hauptentladung. Bei der ersten Entladung, der „Vorentladung“, ergab die Ausmessung der Platte mit dem Zeißschen Längenkomparator für dy bei zwei Verästelungen 0,0956 und 0,060? cm. y , die Entfernung dieser Entladungssteilen von der Plattenmitte, war 0,75 und 3,10 cm. Da die Brennweite des Objektivs 12 cm und die Umdrehungszeit der

Platte 16,7 Sekunden, w also = $\frac{2 \text{ } \mu\text{t}}{10,6}$ war, so ergab sich, daß beide

Vorentladungen 0,0198 und 0,0134 Sekunden vor der Hauptentladung stattgefunden haben. Da die erste dieser beiden Vorentladungen auch nahezu mit dem Anfang der ganzen Entladung zusammenfällt, so hat die Entladung dieses Blitzes rund $\frac{1}{50}$ Sekunden gedauert. 0,0489 Sekunden nach der Hauptentladung setzte die dritte Entladung ein, die nun nicht, wie man erwarten sollte, den ganzen ihr schon bis zur Erde gebahnten Weg benutzt, sondern mitten drinnen (an der Stelle, wo in der Figur 8 der Pfeil hineingezeichnet ist) plötzlich nach

der Seite abspringt, um hier wahrscheinlich in einer zweiten Wolke zu enden, die mehr als 2 km von der ersten Einschlagsstelle entfernt lag. Das ist übrigens nichts Neues, denn schon Lachmann⁹²⁾ hatte Ähnliches auf der Aufnahme eines Rudolstädter Photographen festgestellt. Die Waltersche Aufnahme zeigt aber, daß dieser Seitensprung doch nicht so ganz unvermittelt entstanden ist; vielmehr gingen ihm bereits eine große Zahl von Vorentladungen voraus, die ihm den



Figur 8
Blitzphotographie mit bewegter Kammer von Walter

Weg gebahnt haben, und zwar schon vor dem Auftreten der zur Erde führenden Hauptentladung.

Auch die anderen Waltersehen Blitze zeigen Seitenentladungen, die aber wie die Hauptentladung zur Erde gehen. Hierunter sind einige Blitze, bei denen sich der bekannte Vergleich der Blitzbahn mit einem Flußsystem mit besonderer Deutlichkeit aufdrängt. Natürlich hinkt dieser Vergleich insofern, als ja die Strömung in der Blitzbahn gerade umgekehrt wie im Flußsystem ist. Interessant ist, daß das Aufleuchten der Seitenäste (der Nebenflüsse) meistens gleichzeitig

⁹²⁾ G. Lachmann, Über eine merkwürdige Blitzform. Meteorol. Zeitschr. 18, 80 (1901).

mit der Hauptentladung eintritt. Die aus der Wolke zur Erde fließende Elektrizität schlägt also in dem Augenblick, wo die Hauptentladung erfolgt, gleichzeitig noch mal sehr kräftig in die sämtlichen Seitenzweige der Vorentladungen hinein. Die genaue Ausmessung der Blitzlinien der Hauptentladung gibt sehr schön die stoßweise Entladung auch dieser nur etwa 0,008 Sekunden dauernden Strömung. Die starke Verästelung des Blitzes an der Wolke zeigt, daß die Wolke dabei positiver Pol war. Dicht daneben finden sich aber auch unverzweigte Blitze auf der Platte, die offenbar von einem negativen Wolkenteil ausgehen. Also auch die Blitzphotographien beweisen, wie stark die Ladung in der Wolke wechseln kann. Vielleicht erklärt sich das häufige Nebeneinander von positiven und negativen Blitzen auch so, daß durch die erste positive Entladung erst die folgende negative ausgelöst wird, während sie vorher durch die benachbarte positive gebunden war. Die negativen Blitzentladungen fließen übrigens verhältnismäßig langsamer als die positiven. Hier wird schon deswegen eine kräftigere und kürzere Strömung herrschen müssen, weil ja viel mehr Energie in den vielen Verästelungen verbraucht wird.

Ferner zeigt eine der 16 Blitzaufnahmen einen kurzen positiven „Verbindungsblitz“ von Wolke zu Wolke, der ebenfalls aus zwei Teilentladungen besteht. Aus der unteren Wolke geht dabei gleichzeitig mit der zweiten Teilentladung ein negativer Blitz zur Erde, der offenbar von dem Verbindungsblitz ausgelöst, also von der oberen Wolke gespeist wird. Eine andere Aufnahme zeigt einen sogenannten „Bandblitz“, womit man früher jeden Blitz bezeichnete, der nach der Seite eine gewisse Breite erkennen ließ. Es ist aber bekannt, daß dies nur vom Wind herrührt, der die Entladung etwas seitlich getrieben hat. Des weiteren sind bei den Walterschen Aufnahmen bemerkenswert die „Blitzsysteme“. Ein Beispiel dafür ist folgendes: Eine Wolke sendet anscheinend gleichzeitig nach allen Richtungen Entladungen aus. So gingen einmal aus einer Wolke 5 Schläge nacheinander zur Erde hin, bei denen die Verästelungen der ersten Schläge sich bei den späteren wiederholen. Daraus geht hervor, daß durch die doch schlecht leitenden Nebenzweige schon eine gewisse Verbindung zwischen Wolke und Erde bestanden hat. Vermutlich ist die Leitfähigkeit durch dauernde Teilentladungen, also durch eine Art kontinuierliche Strömung aufrechterhalten worden. Die Einzelschläge stellen dann gleichsam Entladungen eines elektrischen Kondensators von großer Kapazität dar, der durch

den Gewitterprozeß immer wieder aufs Neue geladen wird. Es handelt sich also nicht etwa bei den Einzelschlägen um wirkliche elektrische Schwingungen, sondern um einen schwingungsartigen Verlauf beim Entstehen der Elektrizität in der Gewitterwolke selber. Die Einzelschläge stellen nur ein Auf- und Abschwanken einer gleichmäßigen Strömung dar.

Besonders hat sich Walter⁹³⁾ noch mit dem Nachleuchten der Luft bei Blitzschlägen beschäftigt, die er, wie schon vor ihm L. Weber, durch wirkliches Nachströmen von Elektrizität erklärt, nicht durch Nachglühen und Nachleuchten der Luftteilchen. Als Beweis für die Anschauung führt Walter vor allem an, daß dieses Nachleuchten nicht sofort nach der Hauptentladung einsetzt, sondern erst nach einer kleinen Pause, meist 0,02, in einem Fall erst nach 0,07 Sekunden. Diese Pause hält Walter für eine Erschöpfung; die Neubildung der Elektrizität und ihr Fortleiten aus der Wolke dauert eine gewisse Zeit. Daß starke Gewitter oftmals kein, schwache dagegen oft langdauerndes Nachleuchten zeigen, liegt an der verschiedenen Wolkenkapazität.

Walter⁹⁴⁾ hat seine Blitzstudien in mehrfacher Hinsicht fortgesetzt. Als nächstes Ziel setzte er sich die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Blitzen, die gleichzeitig an verschiedenen Stellen des Gewitterhimmels auftreten. Diese „zusammengehörigen Blitze“ verlaufen zwar räumlich vollkommen getrennt, folgen aber zeitlich in kurzen Zwischenräumen aufeinander, so daß man sich des Gedankens nicht erwehren kann, daß zwischen ihnen ein elektrischer Zusammenhang besteht. Um dies festzustellen, photographierte Walter sie doppelt, mit einer festen und einer bewegten Kammer. Dann erhält man außer den zeitlichen Unterschieden in der bewegten Platte durch den Vergleich mit der festen auch genau die räumlichen Verhältnisse. Übrigens werden an und für sich die örtlichen Verhältnisse auf der

⁹³⁾ B. Walter, Über das Nachleuchten der Luft bei Blitzschlägen. *Annalen der Physik*, 4. Folge 18, 863 (1905), abgedruckt *Meteorol. Zeitschr.* 23, 172 (1906).

⁹⁴⁾ B. Walter, Über Doppelaufnahmen von Blitzen mit einer stehenden und einer bewegten photographischen Kamera. *Jahrbuch der Hamburgischen Wissenschaftlichen Anstalten* 27, Beiheft 5 (1910). Auszug: *Meteorol. Zeitschr.* 28, 426 (1911). — Über die Ermittlung der zeitlichen Aufeinanderfolge zusammengehöriger Blitze, sowie über ein bemerkenswertes Beispiel dieser Art von Entladungen. *Physikal. Zeitschr.* 19, 273 (1918).

festen Platte viel besser dargestellt als auf der bewegten. So ging z. B. bei einem Blitz eine schöne Schleife, die auf der festen Platte gut zu sehen war, auf der bewegten vollkommen verloren. Da die zusammengehörigen Blitze meistens weit voneinander entfernt sind, ist es ziemlich schwierig, sie auf die Platte zu bekommen, und es ist Walter bisher nur in einem Fall im Sommer 1910 gelungen. Dagegen ergab sich bei den Aufnahmen noch eine andere einfachere Art von zusammengehörigen Blitzen. Bei einer starken zur Erde gehenden Entladung gehen von zahlreichen anderen Stellen derselben Wolke gleichzeitig mehrere kleinere aus, die nur zum Teil die Erde erreichen und die meistens nur aus Büschelentladungen bestehen, also Vorentladungen mehr oder weniger fertig gewordener Blitze darstellen. Hierfür hat Walter zwei lehrreiche Beispiele erhalten (1910 und 1918). Die Hauptaufnahme von 1910 zeigt 7 zusammengehörige Blitze, von denen einer eine starke zur Erde gehende Entladung mit etwa 0,3 Sekunden langer Strömung darstellt, während die 6 anderen, viel schwächeren von anderen Stellen der Wolke teils zur Erde, teils zu benachbarten Wolken gehen. Von diesen 6 sind 5 ungefähr gleichzeitig, 0,02 Sekunden vor der starken Entladung aufgetreten. Die Wolke hat also zuerst ungefähr gleichzeitig nach verschiedenen Richtungen Blitze gesprüht, ohne daß ihre Hauptentladung einen dieser Wege befolgte. Der 7. Blitz trat in dem Augenblick auf, wo der Hauptblitz aufhörte, also etwa 0,32 Sekunden nach den 5 Vorentladungen. Er ging als unscheinbares Verbindungsstück zur Nachbarwolke, stellt also einen Nachschub von Elektrizität von dieser Nachbarwolke zur erschöpften Hauptwolke dar.

Die zweite Aufnahme (von 1918) zeigt aus einer 1,8 km hohen, mehr als 1 km langen Wolke, die 7 km vom Beobachter entfernt war, ebenfalls einen Hauptblitz mit einer großen Anzahl von schwächeren Entladungen, die örtlich von ihm getrennt sind, aber zeitlich sämtlich mit ihm in engem Zusammenhang stehen. Der Hauptblitz gabelt sich schon oben in zwei Äste, die beide die Erde erreichen, und zwar erfolgen diese Entladungen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander. Die erste Hauptentladung zeigt nur eine Teilentladung, die zweite dagegen nicht weniger als 7 nacheinander, alle bis zur Erde reichend. Bemerkenswert ist dabei die höchst abwechslungsreiche Art dieser Teilentladungen; 4 von ihnen dauern nur sehr kurze Zeit, eine, die 5., dagegen mehr als 0,1 Sekunde, die 6. besteht wiederum aus zwei Einzelentladungen; mitten in der 7. länger dauernden sieht man deutlich

eine Erschöpfungspause von 0,008 Sekunden. Die Zeiten zwischen den einzelnen Entladungen gehen oft bis zur Grenze des Meßfehlers bei der Zeitmessung, 0,0001 Sekunden, herunter. Dieser vielgestaltige Verlauf der Einzelentladungen muß durch die Verteilung und Bildung der Elektrizität in der Wolke entstehen. Einige der Teilentladungen sind auf beiden Aufnahmen, der festen wie bewegten, unverändert. Sie sind also gleichzeitig aufgetreten. Einige von ihnen sind aber auf der bewegten Aufnahme verschoben, so die Teilentladung der ersten Hauptentladung und eine der kurzen von den 7 Teilentladungen der zweiten. Diese beiden sind also später aufgetreten als alle anderen. Nur diese späteren Entladungen zeigen Büschelbildung und seitliche Ausläufer, d. h. nur bei ihnen bestanden Schwierigkeiten bei der Bildung der Blitzbahn, während alle anderen gebahnte Wege vorfanden. Bemerkenswert ist noch, daß, kurz nachdem sich der zweite Hauptblitz vom ersten trennt, sich zwei wagerechte Seitenäste abzweigen. Walter glaubt, daß sie durch starke Raumladungen entstehen, die seitlich der Blitzbahn bestanden und vielleicht die Ursache dafür waren, daß der Zusammenhang zwischen Wolke und Erde, der durch den ersten Hauptblitz gebahnt wurde, wieder verloren ging.

Um den örtlichen Zusammenhang der zusammengehörigen Blitze noch genauer zu ergründen, hat Walter⁹⁵⁾ Photographien mit drei Kammern ausgeführt, einer beweglichen und zwei festen, die 2 m voneinander entfernt waren. Der stereoskopische Anblick der beiden Bilder, die bei einem Blitz mit den festen Kammern erhalten wurden, läßt erkennen, daß die sich im Einzelbild zum Teil überquerenden Verästelungen des Hauptblitzes räumlich ganz voneinander getrennt verlaufen. Ferner zeigte es sich, daß hinter diesen Verästelungen, 300 m hinter dem Hauptblitz, noch ein zweiter vollkommen selbständiger Blitz aufgetreten ist, der 650 m vom Beobachter entfernt war. Die Aufnahme mit der bewegten Kammer gibt bei dem näheren Blitz Vor- und Nachentladungen; der entferntere Blitz bestand aus zwei Teilentladungen, und zwar fiel die zweite Teilentladung zeitlich mit der Hauptentladung des näheren Blitzes zusammen. Also wieder ein enger Zusammenhang zwischen zwei räumlich vollkommen getrennten Entladungen.

⁹⁵⁾ B. Walter, Stereoskopische Blitzaufnahmen. Physikalische Zeitschr. 14, 1082 (1913).

Durch diese wichtigen Waltersehen Untersuchungen ist die Entstehungsweise des Blitzes, die Art seiner Entladung, der Weg, den er einschlägt, klargelegt. Von großer Bedeutung sind auch die Schlüsse, die man daraus auf das Vorzeichen der Entladungen, sowie auf die Zusammenhänge in räumlich getrennten Teilen der Wolke oder gar verschiedener Wolken ziehen kann. Diese Schlüsse decken sich vollkommen mit denen aus den Messungen des Potentialgefälles, der Niederschlagselektrizität und der Raumladungen.

Die Vervollkommnung der Blitzphotographien hat eine Reile von Fehlerquellen dabei aufgedeckt. Es ist nicht so einfach, einen Blitz zu photographieren, wie man wohl glauben könnte. Auf dabei unterlaufende Fehler hat vor allem Lockyer in England aufmerksam gemacht. Irrtümliche Aufnahmen von Straßenlaternen und von Sternen, z. B. vom Jupiter, sind durchaus möglich. Noch verhängnisvoller kann eine elektrische Bogenlampe werden, die, wie Behn gezeigt hat, bei bewegter Kammer ein Bild liefert wie ein Perlschnurblitz. Eine falsche Einstellung der Kammer gibt eine Verbreiterung der Blitzlinie auf der Platte, ebenso wirkt eine unbeabsichtigte Bewegung. Einen Bandblitz darf man nicht als durch vorgelagerte Wolken verursacht erklären, denn gute Blitzaufnahmen liefern auch bei Linienblitzen, die teilweise durch Wolken verdeckt sind, scharfe Bilder. Auf den Einfluß der verschiedenen Helligkeit der Blitzbahn auf die Platte haben Weber und Walter bei der Deutung ihrer Aufnahmen mehrfach hingewiesen. Auch die früher für eine besondere Entladungsform gehaltenen dunklen oder „schwarzen“ Blitze können, wie Clayden schon 1889 nachwies, vorgetäuscht sein. Das Bild eines nicht zu starken Blitzes kommt, wenn die Platte nachher noch irgendwie Licht erhielt, bei der Entwicklung gar nicht oder umgekehrt zum Vorschein. Es gibt aber, wie Walter 1899 im „Prometheus“ zeigte, noch eine physikalische Erklärung für die schwarzen Blitze, vor allem für solche Blitze, die nur zum Teil dunkel sind. Beispielsweise kann der Hauptblitz hell, seine sämtlichen Verästelungen können aber dunkel sein. Der von den Gasen erfüllte Blitzkanal muß helles Licht stärker absorbieren als die Umgebung, so daß er unter Umständen dunkel erscheinen muß, genau wie bei der Umkehr der Spektrallinien.

Klingelfuß^{9d)} nahm mit einer festen Kammer einen schönen

^{9d)} F. Klingelfuß, Über einen Blitzwirbel, beobachtet am 15. Juli 1902 über Basel. Annalen der Physik, 4. Folge 10, 222 (1903).

Blitz auf, der aus mehreren Wirbeln heller Linien bestand. Innerhalb einer Schraubenlinie dieses Wirbels konnte er mehr als 50 parallele Linien zählen. Er deutete diese Entladung als eine Ablenkungswirkung des Erdmagnetismus. Walter glaubt jedoch, weil sonst solche magnetischen Einflüsse nirgends bemerkbar sind, daß ein heftiger Wirbelwind die Erscheinung hervorgerufen hat.

Die Spannung und Stromstärke des Blitzes läßt sich aus seinen Wirkungen, vor allem den Wärme- und magnetischen Wirkungen schätzen. Töpler nimmt auf Grund seiner Laboratoriumsversuche als Spannung 40000 Volt pro Zentimeter für einen starken Blitz an. W. Kohlrausch⁹⁷⁾ berechnet die Stromstärke zu 52000 und 9200 Ampere, oder 52 und 9,2 Coulomb, unter der Annahme, daß der Blitz eine 5 mm dicke Kupferleitung schmilzt und 0,001 bzw. 0,03 Sekunden dauert. Dieselbe Größenordnung wie Kohlrausch aus der Wärmewirkung berechnet Riecke⁹⁸⁾ aus der Schlagweite, nämlich 43 bis 98 Coulomb. Pockels⁹⁹⁾ benutzt die magnetische Wirkung. Er berechnet aus dem durch Blitzschlag hervorgerufenen remanenten Magnetismus von drei Basaltstücken Stromstärken von 6450, 10800 und 6600 Ampere; in einem späteren Fall aus einigen Basaltstäben, die auf dem Monte Cimone in den Apenninen in der Nähe eines Blitzableiters ausgelegt waren, beim stärksten Blitz 11000 Ampere. Dann berechnet noch Humphreys¹⁰⁰⁾ aus der Schmelzwirkung eines Kupferrohrs 90000 Ampere.

Die magnetische Wirkung der Blitze hat Töpler¹⁰¹⁾ dazu benutzt, um die Strömungsrichtung der Blitze festzustellen. Der Blitz erzeugt wie jeder elektrische Strom ein elektrisches Feld um seine Bahn. Körper, die sich in der Nähe befinden, können dauernd

⁹⁷⁾ W. Kohlrausch, Die Berechnung von Blitzableitern und ein Versuch, die Elektrizitätsmenge der Gewitterentladungen zu schätzen. Elektrotechn. Zeitschr. 9, 123 (1888).

⁹⁸⁾ E. Riecke, Über die in einem Blitzschlag zum Ausgleich kommenden Elektrizitätsmengen. Göttinger Nachrichten 1895, S. 419.

⁹⁹⁾ F. Pockels, Ein Versuch, die bei Blitzschlägen erreichte maximale Stromstärke zu schätzen. Meteorol. Zeitschr. 15, 41 (1898). — Über die bei Blitzschlägen erreichte Stromstärke. Physikal. Zeitschr. 2, 306 (1901).

¹⁰⁰⁾ W. J. Humphreys, Bemerkung über das Schmelzen eines Kupferrohrs durch den Blitz. Monthly Weather Review, Washington 43, 396 (1915).

¹⁰¹⁾ M. Töpler, Über die Richtung der elektrischen Strömung in Blitzen. Meteorol. Zeitschr. 18, 481 (1901).

magnetisiert werden. Diese Magnetisierung wird bei einem positiven Blitz (Wolke positiv, Erde negativ) umgekehrt sein als bei einem negativen (Wolke negativ, Erde positiv). Man muß aber deswegen in seinen Schlüssen etwas vorsichtig sein, weil der Blitz ähnlich wie in den Drahtleitungen in den Körpern auch elektrische Schwingungen auslöst, die ihrerseits meist in anderer Richtung magnetisch wirken können. Töpler suchte mit einem Kompaß die Ringfelder von Blitzschlägen, auch solcher ohne sichtbare Spuren, im Gestein ab. Dabei lassen sich, trotzdem sich vor allem an den Kuppen die Blitzspuren oft kreuzen, meistens ganz gut nordmagnetische und süd magnetische Gesteine unterscheiden. Wenn z. B. an einer Kuppe westlich der Blitzspur Nordmagnetismus, östlich Süd magnetismus sich findet, so ist hier der positive Strom aus der Kuppe in die Luft gegangen. Die Erde war also Anode, der Blitz negativ. Töpler nennt die so gefundene Blitzspur positiv. Aus insgesamt 92 Blitzspuren in Sachsen und Böhmen, darunter auch einigen an Bäumen mit Drahtumgebung, fand er 59 positive und nur 33 negative Spuren. Meistens erfolgt hiernach die Entladung von der Erde zur Wolke und die Wolken müßten vorwiegend negativ sein. Wahrscheinlicher ist aber nach Töpler folgende Erklärung: In der Wolke und am Boden bilden sich sowohl positive als negative Büschel, die aufeinander zu wachsen. Der Entladungskanal zwischen diesen rasch wachsenden Büscheln erscheint uns als Blitz. Nun verästeln sich die Blitze vor allem an ihrer positiven Seite. Ein Blitz aus positiver Wolke trifft also die Erde nur in schwachen Ästen, die keine oder schwächere magnetische Spuren hinterlassen. Dagegen hat ein Blitz mit der Erde als Anode am Erdboden zahlreiche starke Äste und daher im Boden auch stärkere magnetische Wirkung. Man kann danach bei gleicher Häufigkeit beider Stromrichtungen doch mehr Blitzspuren der Stromrichtung Erde—Wolke finden. Nach derselben Methode schließt Platania¹⁰²⁾ aus den am Ätna beobachteten Einschlügen in Lavamassen, daß die Erde häufiger Anode als Kathode war.

Die hier zur Messung von Stromstärke und -richtung benutzte Wirkung des Blitzes kann unter Umständen für die Schifffahrt unangenehm werden, weil sie Störungen am Kompaß zur Folge haben kann. Die Schmelzwirkung der Blitze führt zu eigentümlichen Erscheinungen.

¹⁰²⁾ Nature, London, 98, 209 (1916).

So entstehen die Blitzröhren (Fulgurite) durch das Schmelzen des Quarzsandes, in den der Blitz schlägt. Ein in den Draht eines Fesselballons oder Drachens schlagender Blitz vergast oft sofort den ganzen Draht, so daß nur eine Rauchwolke von ihm übrig bleibt. Die übrigen Blitzwirkungen können hier nur gestreift werden. Bei der Wirkung auf Pflanzen ist bemerkenswert, daß das Aussehen mancher Kulturen Entladungen, etwa durch die feuchten Pflanzen hindurch an der Erdoberfläche entlang zu beweisen scheint. Viel ist über das Verhalten von Bäumen gegenüber dem Blitzstrahl geschrieben worden. Nach Stahl¹⁰³⁾ ist die Ursache für das so sehr verschiedene Verhalten der Bäume in zweierlei zu suchen, einmal in den Wasserverhältnissen des Bodens und dem Standort der Bäume überhaupt und dann in der verschiedenen Spaltbarkeit des Holzes und der äußeren Rindenform.

Viel Beachtung hat man früher der Farbe der Blitze geschenkt, und noch heute wird in den Gewitterbeobachtungsnetzen regelmäßig auf den Meldekarten auch die Farbe der Blitze angegeben. Die Färbung erklärt sich aus den leuchtenden Gasen, welche die Blitzbahn bilden. Die genaueste Auskunft darüber gibt das Blitzspektrum, das, wie Kundt 1868 zeigte, beim Linienblitz stets ein Linienspektrum ist. Am deutlichsten ausgeprägt sind darin die Stickstofflinien, schwächer, aber doch fast immer vorhanden die Sauerstofflinien, sowie die vom Wasserstoff, dieser offenbar vom zersetzten Wasser herrührend. Eine Statistik, die Spencer C. Russell¹⁰⁴⁾ aus den englischen Meldungen der Jahre 1903—1907 aufmachte, ergab fast gleichviel rote, blaue und weiße Blitze, etwas mehr als halb so viel violette und gelbe, etwa ein viertel so häufig orange und grüne. Bei Hagel treten oft blaue Blitze auf.

Der Hauptzweck des Blitzableiters ist, dem Blitz einen raschen und ungefährlichen Weg zu geben. Jeder Schornstein ist ein Blitzableiter, weil die Flammengase sehr gute Leiter sind. Das wird durch die Statistik der Blitzschläge bestätigt. So wurden in Schleswig-Holstein nur 0,3 von 1000 Schornsteinen, dagegen 6,3 Kirchen und 8,5 Windmühlen vom Blitz getroffen.

Der Donner. Die älteste Erklärungsweise für den Donner, von der sich merkwürdigerweise auch Franklin noch nicht losgelöst hatte,

¹⁰³⁾ E. Stahl, Die Blitzgefährdung der verschiedenen Baumarten. Jena (G. Fischer) 1912.

¹⁰⁴⁾ A. v. Obermayer, Zur Farbe der Blitze. Meteorol. Zeitschr. 29,433 (1912).

ist die, daß der Donner durch den Zusammenstoß der Wolken entstehen soll. Aber schon der Engländer Hooke gab ein halbes Jahrhundert vor Franklin die richtige Deutung. Der Donner entsteht durch den Schall der Luftwellen nach den leuchtenden Entladungen. Eine genaue Untersuchung über die Fortpflanzung des Donners verdanken wir Meinardus¹⁰⁵). Er geht aus von den Blitzen ohne wahrnehmbares Geräusch und unterscheidet dabei zwischen objektiven und subjektiven Blitzen. Unter jenen versteht er das Sichtbarwerden einer elektrischen Entladung, bei der ein stiller Ausgleich der Spannungen erfolgt, unter diesen die Blitze, die wohl mit Lufterschütterungen verbunden sind, bei denen jedoch die Schallwellen das Ohr des Beobachters nicht erreichen. Diese subjektiven Blitze sind auch bei uns sehr häufig. Man kann bei jedem Gewitter die Erfahrung machen, daß, selbst wenn der Himmel schön von den grellsten Blitzen erleuchtet ist und der Wolkenkragen sehr weit gegen den Zenith vorgeückt ist, noch kein Donner gehört wird. Die Schallweite des Donners reicht nur selten 40 bis 50 Sekunden nach dem Blitz, d. h. in der Regel nicht mehr als 15 km, eine höchst auffallende Tatsache, die nicht allein durch die geringe Stärke des Donners erklärt werden kann. Vielmehr muß man dafür die Luftschichten, die der Schall durchdringt und an denen eine Brechung (Refraktion) der Schallwellen stattfindet, verantwortlich machen. Maßgebend ist in erster Linie die Temperaturänderung mit der Höhe, ferner die Luftdruck- und Dampfdruckänderung, sowie der Wechsel der Windrichtung und Stärke mit der Höhe. Allerdings wird der einfache Vorgang der Schallbrechung durch mancherlei Umstände abgeändert, so vor allem durch die Reflexion der Schallwellen an den Wolken und an der Erdoberfläche mit ihren vielen Unebenheiten.

Experimentelle Untersuchungen über die Schallwellen der Luft beim Donner hat W. Schmidt¹⁰⁶) ausgeführt. Indem er diese Schwingungen durch leichte Metallplatten oder eine rußende Flamme sichtbar machte, zeigte er, daß das eigentliche Rollen, das „Echo“ im Gegensatz zum direkten Schall des Donners, das man früher fälschlich durch die

¹⁰⁵) W. Meinardus, Über das Wetterleuchten. Meteorol. Zeitschr. 12, 14 (1895).

¹⁰⁶) W. Schmidt, Über das Wesen des Donners. Wiener Sitzungsberichte IIa, 123,821 (1914). — Welche Arten von Schallreflexion kommen für Donner in Betracht? Meteorol. Zeitschr. 31, 33 (1914).

Länge der Blitzbahn erklärte, zum Teil von intermittierenden Entladungen, zum Teil von der Reflexion der Schallwellen herrührt. Diese Reflexion ist möglich an den Wolken, aber auch an der Grenze zweier Luftschichten von verschiedener Feuchtigkeit oder Temperatur. Nur im letzten Fall kommt eine merkliche Energie für den reflektierten Schall heraus. Je mehr sich der Einfallswinkel der Schallwellen auf die Grenzschicht dem Fall der totalen Reflexion nähert, um so stärker wird das Rollen des Donners.

Das Wetterleuchten stellt meistens eine Aufhellung der Wolken oder Himmelsteile dar durch Blitze entfernter Gewitter. Oft ist aber das Wetterleuchten auch ein naher Flächenblitz, unter welchem Namen man seit Arago die Blitze zusammenfaßt, die ganze Umrisse einer Wolke, häufig auch die ganze Wolkenoberfläche entladen. Daß der Flächenblitz nicht etwa nur ein von Wolken verdeckter Linienblitz ist, geht aus seinem Spektrum hervor, das nicht ein Linien-, sondern ein Bandenspektrum ist, und zwar überwiegen meistens die Stickstoffbanden. Die Entladungsdauer ist beim Flächenblitz meistens erheblich länger als beim Linienblitz, meist dauern die Flächenblitze 0,1 Sekunde.

6. Der Kugelblitz

Es ist seit langem bekannt und durch eine Fülle guter Beobachtungen verbürgt, daß die elektrischen Entladungen bei Gewittern außer in Form von Linien- und Flächenblitzen auch in Form von Feuerkugeln erfolgen kann. Vor allem Arago hat diesen eigentümlichen Erscheinungen seine Aufmerksamkeit gewidmet und eine Reihe klassischer Berichte über Kugelblitze gesammelt. In Deutschland hat Sauter¹⁰⁷⁾ in Ulm ein großes Material zusammengetragen.

Der Kugelblitz ist uns noch heute ein Rätsel. Wenn auch, vor allem durch die Untersuchungen Töplers, manches neue Licht auf die Erscheinung gefallen ist, so gilt doch im großen und ganzen heute noch, was L. Weber¹⁰⁸⁾ vor fast 40 Jahren darüber ausführte. „Je weiter die exakte Forschung fortschreitet, um so größer wird die Ver-

107) prof sauter, Über Kugelblitze. Beilage zum Programm des Realgymnasiums in Ulm 1892.

108) L. Weber, Über den gegenwärtigen Stand der Kugelblitzfrage. Meteorol. Zeit sehr. 2, 118 (1885).

legenheit, mit der sie der Erscheinung gegenübersteht. Mitunter harmlos verlaufend, oft aber von furchtbaren Zerstörungen begleitet, mit unheimlicher Gewalt ausgerüstet, immer rätselhaft und unerklärt, wurden die Kugelblitze von Arago als eine dritte Klasse von Blitzen bezeichnet. Ihre typischen Merkmale sind die längere, oft bis zu Minuten gehende Dauer, die verhältnismäßig langsame, mit dem Flug der Vögel, dem Laufen eines Tieres oder dem Rollen einer Kegelkugel vergleichbare Bewegung und die stets rund oder oval erscheinende Form. Der Kugelblitz ist fast immer der Begleiter starker elektrischer Entladungen der Atmosphäre. Bald erscheint er nach einer Entladung, bald geht er einer solchen voraus. Zuweilen verschwindet er spurlos, dann wieder endet er mit furchtbarem Knall. Die Größe der Kugel wird bald mit einem Hühnerei, bald mit einem Wagenrade verglichen. Oft folgt der Kugelblitz den Dachkanten der Häuser, manchmal dem Blitzableiter. Ebenso oft verschmäht er derartige Wegweiser und irrt förmlich umher ohne erkennbares Gesetz und Ziel/' Er dringt sogar in das Innere der Häuser, nicht nur bei offener, sondern selbst bei geschlossener Tür. Leß¹⁰⁹⁾ hat einmal einen rötlichen Kugelblitz beobachtet, der 1 bis 2 Sekunden sich über einer Wolke fortbewegte und dessen Durchmesser er zu 20 m schätzte.

Zu den Kugelblitzen sind auch die sogenannten Perlschnurblitze zu zählen. Der Name rührt von Planté her und gibt gut <len Anblick der Erscheinung wieder. In diesem Blitze sind eine ganze Zahl von Leuchtkugeln aneinandergereiht wie Perlen in einer Schnur. Diese Blitzart ist sogar schon photographiert worden. Sie stellt offenbar einen Übergang dar zwischen Linien- und Kugelblitz. Auch der Perl-«schnurblitz kann vom Winde bewegt werden.

Die wissenschaftliche Forschung ist, nachdem sie sich zunächst darauf beschränkt hatte, die Glaubwürdigkeit der Berichte nachzuprüfen, bald dazu übergegangen, auf experimentellem Wege ähnliche Erscheinungen zu suchen. Am weitesten ist hier Planta¹¹⁰⁾ in Frankreich gegangen, der mittelst hochgespannter Ströme kleine künstliche Feuerkugeln, aus geschmolzenem Metall bestehend, herstellte. Die Übertragbarkeit dieser Versuche auf die Atmosphäre wurde aber bald

¹⁰⁹⁾ E. Less, Kugelblitz über Wolken. Meteorol. Zeitschr. 18, 39 (1901).

¹¹⁰⁾ G. Planta, Die elektrischen Erscheinungen der Atmosphäre. Deutsch von Wallentin. Halle 1889.

angefochten und so erfahrene Beurteiler der atmosphärischen Elektrizität wie Elster und Geitel¹¹¹⁾ sagen darüber: „Man begreift in der Tat nicht, wie die Plantaschen Versuche noch immer zu einer angeblichen Erklärung dieser Erscheinung herangezogen werden können/' Dagegen hat der italienische Physiker Righi, der ähnlich wie schon einige Jahre vor ihm v. Lepel Funkenentladungen durch feuchte Luft anstellte, bei der Entladung von Leydener Flaschen kugelförmige leuchtende Massen erhalten.

Genaue Studien, die Töpler¹¹²⁾, von Righis Versuchen ausgehend, an den Büschellichtbogen solcher Laboratoriumsentladungen anstellte, führten ihn zu folgenden Anschauungen über das Wesen der Kugelblitze. Der Büschellichtbogen stellt einen Entladungsvorgang dar, der vielfach dem Kugelblitz ähnelt. Beim Kugelblitz wird der gesamte Entladungsvorgang eingeleitet durch einen Linienblitz, den Anfangs- oder Initialblitz. Im Entladungskanal, der stark leitend bleibt, tritt ein Nachfließen ein, das sich, wenn es sehr regelmäßig erfolgt, als Kugelblitz äußert. Die Leuchtmasse besteht aus verdünnten Gasen, die von einer Lichthülle umgeben sind. Die Bewegung der Masse kann außer durch die elektrischen Kräfte auch durch den Wind erfolgen. Das Ende des Entladungsvorgangs kann entweder lautlos oder durch einen Endblitz mit Knall erfolgen. Die Leuchtmasse kann sich bilden über jeder Fläche, die intensiv Elektrizität abgibt. So wirkt z. B. ein Dach als neuer Pol, und zwar sowohl nach außen wie nach innen. Das Passieren der Leuchtmasse durch das Dach hindurch ist also dann nur scheinbar.

Die Stromstärke der Kugelblitze ist nach Töpler viel kleiner als die der Linienblitze. Bei seinen Büschellichtversuchen maß er Stromstärken von 0,001 Ampere pro Quadratmillimeter. Daraus schätzt er je nach der Oberfläche und der Größe der Feuerkugel die Stromstärke in Kugelblitzen zu 4 bis 15 Ampere. Nimmt man an, daß der Kugelblitz statt eines 60 bis 100 Coulomb führenden 0,01 Sekunde dauernden Linienblitzes dieselbe Menge in der sehr viel größeren Zeit von 5 bis 30 Sekunden entladet, so kommt man zu Stromstärken

¹¹¹⁾ J. Elster und H. Geitel, Zusammenstellung der Ergebnisse neuerer Arbeiten über atmosphärische Elektrizität. Beilage zum Programm des Gymnasiums Wolfenbüttel 1897.

¹¹²⁾ M. Töpler, Zur Kenntnis der Kugelblitze. Meteorol. Zeitschr. 17, 543 (1900).

von 20 bis 2 Ampöre. Doch sind das wahrscheinlich alles obere Grenzwerte.

Im Jahre 1917 beobachtete Töpler¹¹³⁾ in Dresden einen Perlschnurblitz aus einer nur 280 m hohen Gewitterwolke zu einer 33 m hohen Dachecke. Nach einem linienförmigen Anfangsblitz bildeten sich die Perlen, ovale Gebilde von fast 5 m Querschnitt und 7 m Längsdurchmesser in einem Abstand voneinander von 7,5 m. Diese Perlen waren durch rötliche Kanäle von etwa 3 m Durchmesser verbunden. Das Ganze verhielt sich wie ein starres Gebilde, das innerhalb der Beobachtungsdauer von 2 Sekunden um etwa 10 m heruntersank. Bei der Erklärung geht Töpler wieder von der Righischen Schichtung der Lichtbüschel aus. Die Nebeltröpfchen der Wolke werden influenziert, vor- und rückwärts schießen aus ihnen Büschel heraus, die sich zu einer Reihe in der Bahn des Linienblitzes vereinigen. Nach dem Erlöschen dieses Anfangsblitzes befinden sich an den Zentren der ursprünglichen Büschel Ionen, die sich beim Einsetzen einer Dauernachentladung zu den Perlen vereinigen. Wesentliche Vorbedingung für einen Perlschnurblitz ist das Zusammentreffen einer unvollständigen Anfangsentladung mit einem langdauernden starken Nachfließen. Diese Anschauung der Büschelbildung in kleinen Tröpfchen überträgt Töpler¹¹⁴⁾ dann auf jede Blitzbildung. Das bis zu 40000 Volt/cm starke elektrische Feld führt an den Tröpfchen zu Büschelentladungen, woraus durch Gleitbüschelbildung und Aneinanderreihen von Büscheln die Blitzbahn entsteht. Wichtig ist es, den Durchmesser der Endbüschel beim Blitz zu kennen, weil sich daraus die Spannung des Blitzes berechnen läßt. Bei dem in Dresden beobachteten Perlschnurblitz fand sich der Abstand der Perlenzentren zu 7,5 m. Daraus würde sich für einen 2 km langen unverzweigten Linienblitz eine Mindestspannung von 40 Millionen Volt und eine Energie von 10^{16} bis 10^1 Erg berechnen.

Ungefähr gleichzeitig mit Töpler hat Hesehues¹¹⁵⁾ in Rußland Versuche mit Wechselstrom und Wasserflächen als Elektroden aus-

¹¹³⁾ M. Töpler, Zur Kenntnis der Gesetze der Bildung von Leuchtmassen (Perlen) bei Perlschnurblitzen. Meteorol. Zeitschr. 34, 225 (1917).

¹¹⁴⁾ M. Töpler, Gewitter und Blitze. Vortrag im Bezirksverein Deutscher Ingenieure und im Dresdener Elektrotechnischen Verein. Dresden 1917.

¹¹⁵⁾ N. A. Keshues, Kugel- und Flammenblitze als besondere Entladungsprozesse der atmosphärischen Elektrizität. Meteorol. Zeitschr. 17, 382 (1900). Physikal. Zeitschr. 2, 579 (1901).

geführt. Dabei traten schöne und wechselnde Lichterscheinungen auf, Flammen oder sehr bewegliche kugelförmige Gebilde. Hesehues glaubt, daß brennender Stickstoff die Ursache der Kugelblitze ist. Diese Ansicht hat neuerdings Simpson¹¹⁶⁾ wieder aufgenommen. Nach Versuchen von Strutt kann „aktiver“ Stickstoff auch dann noch glühen, wenn er schon aus dem starken Feld herausgebracht ist. Thornton¹¹⁷⁾ hat die Vorstellung entwickelt, daß negativ geladener Ozon das Leuchtgas der Kugelblitze sei. Das Fallen der Kugel erklärt er dadurch, daß Ozon schwerer als Luft ist, den Knall als Rückverwandlung in Sauerstoff. Darüber kann wohl jedenfalls kein Zweifel bestehen, daß die Leuchtmasse aus Gasen besteht, die aus der Luft entnommen werden. Deswegen ist eine Theorie, die Walter¹¹⁸⁾ aufgestellt hat, wonach die Masse aus elektrisch geladenen Wasserblasen bestehen soll, recht unwahrscheinlich. Dagegen ist mit Recht eingewendet worden, daß reines Wasser gar keine Blasen gibt, daß ein dauerndes Leuchten dadurch nicht erklärt werden kann und daß eine Bewegung in das Innere von Gebäuden dabei unmöglich ist. Interessant, wenn auch wohl nicht zutreffend ist eine Theorie, die Carlheim-Gyllenskiöld auf der Innsbrucker Meteorologenkonferenz im Jahre 1905 vorgetragen hat. Danach sollten die Kugelblitze Wirbel einer völlig ionisierten Luftmasse darstellen.

7. Vulkan- und Staubgewitter

Es ist lange bekannt, daß der Ausbruch von Vulkanen zur Gewitterbildung führen kann. Hann zählt diese Gewitter zu den Wärmegewittern. Doch trifft das wohl deswegen nicht zu, weil hier noch eine neue Art von Elektrisierung, nämlich durch den Staub und die Asche hinzutritt. Palmieri, der als erster die Luftelektrizität bei Vulkanausbrüchen untersucht, stellte schon fest, daß die Stärke der Elektrisierung von der ausgeworfenen Aschenmenge abhängt. Sapper¹¹⁹⁾ berichtet, daß [vor allem

¹¹⁶⁾ G. C. Simpson, Einige Probleme der atmosphärischen Elektrizität. *Monthly Weather Review* 44, 115 (1916).

¹¹⁷⁾ W. M. Thornton, Über Kugelblitze. *Philosophical Magazine* (6) 21, 630 (1911).

¹¹⁸⁾ B. Walter, Über Kugelblitze. *Meteorol. Zeitschr.* 26, 217 (1909).

¹¹⁹⁾ E. Sapper, Elektrische Erscheinungen bei den Vulkanausbrüchen in Mittelamerika. *Meteorol. Zeitschr.* 22, 139 (1905).

die windgeschützte Seite mittelamerikanischer Vulkane stark elektrisierte Luft hat. Die Elektrizität geht hier „den Leuten aus den Kleidern“. Überall treten Kugelblitze auf, die, ohne Schaden anzurichten, mit dumpfem Knall zerplatzen. Knoche¹²⁰⁾ sah bei einem starken Gewitter am Fuße eines 2800 m hohen Vulkans in Chile haushohe Flammen den Schneeberg entlang hüpfen. Nach der elektrischen Entladung fällt, wie man vor allem am Vesuv beobachtet hat, der Aschenregen zu Boden.

Nun wird bei Vulkanausbrüchen auch der Wasserdampf und die Wolkenbildung noch eine große Rolle spielen. Es gibt aber auch Gewitter ohne Wolkenbildung. So können in Dominica bei den Stürmen (Hurrikanen) auch bei klarem Himmel Flächenblitze auftreten. Bei Staubstürmen in Kansas¹²¹⁾ treten bei außerordentlich trockener Luft an Zäunen, Mühlen usf. Funken auf von mehreren Zoll Länge. Der wolkenlose Himmel ist dabei von einer kupferfarbigen Dunstschicht bedeckt. Auch die von Rudge in Südafrika beobachteten Staubstürme haben eine ähnliche Wirkung. Leuchtturmwärter am Indischen Ozean berichten von starkem St. Elmsfeuer und sogar von Flächenblitzen bei meist geringer Bewölkung. Ein englischer Schiffskapitän¹²²⁾ beobachtete bei Kap Verde nachts, wo nur hohe Wolken und Sterne sichtbar waren, eine Stunde lang ringsum das Schiff Blitz und Donner. Dabei wehte ein warmer staubgeladener Wind von der afrikanischen Küste her. Alle Masten, das Tauwerk usw. sahen aus, als hätten sie Glühlampen, und es war ein Knistern und Krachen hörbar wie von brennenden Zweigen.

Schon diese Naturbeobachtungen lassen keinen Zweifel daran, daß in stark staubhaltiger Luft allein durch die Reibung, wie sie in den Luftströmungen stets eintreten muß, eine Elektrisierung und Elektrizitätstrennung eintritt. Neuerdings hat man diesen Vorgängen in der Industrie erhöhte Beachtung geschenkt. Die verschiedenen Staubarten, die in allen nur denkbaren Industriezweigen ausfallen, haben häufiger, als bekannt ist, zu oft folgenschweren Explosionen geführt, so der Kohlenstaub und der Mühlenstaub¹²³⁾. Die beste Kenntnis

¹²⁰⁾ W. Knoche, Elektrische Entladungen am Vulkan Villa-Rica. Meteorol. Zeitschr. 82, 555 (1915).

¹²¹⁾ S. D. Flora, Staubstürme in Kansas. Monthly Weather Review 41, 416 u. 894 (1913).

¹²²⁾ Gewitter bei heiterem Himmel. Meteorol. Zeitschr. 20, 189 (1903).

¹²³⁾ P. Beyersdörfer, Staubexplosionen. Umschau (Frankfurt a. M.) 27, 108 (1923).

haben wir von den Zuckerstaubentzündungen. Die Ursache ist zweifellos der feinste, überzerkleinerte Zuckerstaub. Versuche mit diesem feinsten Staub zeigten, daß durch Reibung dieses Staubes eine ungeheure Elektrisierung eintritt. So konnten z. B. beim Wirbeln von Zuckerluft mittelst Druckluft in einem isoliert aufgestellten Metallgefäß Funken von 1 cm Länge gezogen werden. Das entspricht einer Spannung von über 20000 Volt. Beim Ausblasen von Zuckerstaubluf durch einen engen Spalt leuchtet die Luft im Dunklen stark. Durch Reibung in einem dünnen Metallrohr ließ sich der Staub so elektrisieren, daß 1 g Staub 84000 elektrostatische Einheiten Elektrizität hatte, d. h. auf 1 g kamen 176 Billionen Elektronen. Die Explosion entsteht also einzig und allein durch die Reibungselektrizität und kann nur durch nasse Entstaubung verhindert werden. So ein schwebendes Staubteilchen hat, wie ultramikroskopische Messungen ergeben haben, etwa die Größe $1(T''^7 \text{ cm})$. Dieser Staub ist als Aerosol in der Luft kolloidal gelöst (vgl. S. 50). Dabei überzieht sich nach Beyersdörfer das Teilchen, das in hohem Grade die Fähigkeit der Adsorption besitzt, mit einer Lufthaut, die vorwiegend aus Sauerstoff besteht. Das ist kürzlich von Jaeckel experimentell nachgewiesen worden. Durch diese Sauerstoffschicht wird natürlich die Entzündung außerordentlich begünstigt.

Diese Staubexplosionen können wir als Staubgewitter bezeichnen. Beyersdörfer und Kercher¹²⁴⁾ haben kürzlich ein atmosphärisches Staubgewitter beschrieben, das Kercher in Süddeutschland beobachtete. In einer 30 m hoch emporgewirbelten Staubwolke erschien während eines Gewitters oben ein flächenblitzartiger Feuerschein, der als Verbrennung des an dem feinen Staub gelagerten Sauerstoffs erklärt wird. Beyersdörfer und Kercher versuchen daraus eine allgemeine Erklärung der Gewittererscheinungen herzuleiten. Die Atmosphäre enthält bei Gewittern vor allem zwei Aerosole kolloidal gelöst, die flüssigen und festen Teilchen. Durch die heftigen Bewegungen im Gewitter werden diese Aerosole weit über ihre Kapazität hinaus aufgeladen, so daß ein Ausgleich durch sichtbare Entladungen erfolgt, bei schwächerer Überladung durch Flächenblitze, bei stärkerer durch Linienblitze.

¹²⁴⁾ P. Beyersdörfer und F. Kercher, Über eine elektrische Entladung in einer Straßenstaubwolke. Meteorol. Zeitschr. 39, 395 (1922).

8. Gewitter und Funkentelegraphie

In neuester Zeit hat sich eine neue Möglichkeit der Gewitterforschung eröffnet durch die Fortschritte der drahtlosen Telegraphie. Schon bald nach den ersten großen Entdeckungen kam der Gedanke auf, sie zur Gewitteraufzeichnung und -warnung zu benutzen. Als erster hat wohl Popoff in Kronstadt (Siebenbürgen) im Jahre 1895 die Einwirkung von Blitzentladungen auf einen langen vertikalen Leiter mit einem Kohärer untersucht. Dann hat vor allem Fenyi in Budapest einen Gewitterregistrierapparat gebaut. Viel war allerdings mit einer solchen Versuchsanordnung nicht anzufangen. Sie zeichnete in der Tat eine Unmenge Entladungen auf, die bisweilen mit den Blitzentladungen zusammenfielen, gab aber auch vielfach Aufzeichnungen, die kaum zu deuten waren. Das wurde erst anders, als an Stelle des Kohärers der Richtungsempfänger gesetzt wurde, der gestattet, wenigstens annähernd den Ort der Störung, die das Gewitter in der drahtlosen Telegraphie stets hervorruft, anzugeben. Eine solche Richtungsantenne wurde in England während des Krieges von Cave und Watt¹²⁵⁾ angewandt. Am besten gelingt das Anpeilen einer Störung, auch einer Gewitterstörung, durch ein Stationsdreieck. Aber auch so kann man keine Angabe, etwa ausgedrückt in Graden, erhalten, sondern man muß sich mit einer ungefähren Vorstellung über die Richtung, aus welcher die Störung kommt, begnügen. Immerhin gelingt es auf diese Weise, die häufigsten Herde der atmosphärischen Störungen aufzufinden. Zusammen mit der bekannten Gewitterhäufigkeit eines Landes ist es so möglich, die Stellen anzugeben, wo die meisten und die geringsten Störungen auftreten. So ist in Deutschland, wo ebenfalls nach ähnlichen Methoden wie in England gearbeitet wird, das Binnenland sehr reich an Störungen. Am günstigsten liegen die Verhältnisse an der nördlichen Nordseeküste Schleswig-Holsteins.

Die den Funkenverkehr sehr hemmenden „atmosphärischen Störungen*“, die stets mehr oder weniger vorhanden, aber bei Böen und Gewittern am stärksten sind, machen sich im Telephon als zischende, knackende und knisternde Geräusche bemerkbar, und scheinen je nach

¹²⁵⁾ C. J. P. Cave und R. A. W. Watt, Das Studium der atmosphärischen Radiotelegraphie in ihrer Beziehung zur Meteorologie. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, London 39, 35 (1923).

der Art des Geräusches verschiedenen Ursprung zu haben¹²⁶). Kurzes Knacken ist anscheinend vielfach auf Blitzentladungen zurückzuführen, lautes Brodeln auf Niederschläge, vor allem Graupeln und Schnee, die in der Nähe der Antenne niedergehen, während die anderen oft stundenlang dauernden Störungen, Zischen und Knistern, sowie auch die Geräusche, die dem Abbröckeln des Mauerwerks ähneln, auf die Schichtung der oberen Luftschichten zurückzuführen sind. Hier spielen Inversionen und Gleitflächen eine große Rolle.

Herath¹²⁷) maß in Lindenberg den Strom, der im Draht eines Drachengespanns zur Erde fließt. Er erhielt bei einer warmen Front (vgl. S. 37) einen gleichmäßigen Strom, dagegen bei einer kalten Front viele Schwankungen und Sprünge. Bei einem Einbruch kalter Luft ist also die Schichtung der Atmosphäre am unstetigsten, daher auch, wie zu erwarten war, die der elektrischen Raumladung. Gerade hier sind also dann die Vorbedingungen für die Böen- und Gewitterbildung gegeben.

¹²⁶) Vgl. die zusammenfassende Darstellung von F. Schindelhauer: Über den Einfluß der Schichtung der Atmosphäre auf die Ausbreitung der Wellen der drahtlosen Telegraphie. Meteorol. Zeitschr. 37, 177 (1920).

¹²⁷) Y. Herath, Meteorologie und Wellentelegraphie. Zeitschrift für technische Physik 4, 116 (1923).

IL Teil

Die Erklärung der Gewitterelektrizität

Eine Kritik der bisherigen Erklärungsversuche der Gewitterelektrizität, wie sie im folgenden gegeben werden soll, muß sich auf die wichtigsten Gesichtspunkte beschränken; denn es ist unmöglich, jede der überaus zahlreichen Gewittertheorien zu besprechen. Viele von ihnen sind ja geradezu abenteuerlich zu nennen. Andererseits darf man auch nicht alle von vornherein verwerfen, schon deswegen nicht, weil vielleicht nicht nur eine einzige, sondern eine ganze Reihe von Ursachen bei der Bildung der Gewitterelektrizität beteiligt sind. Auch eine falsche Vorstellung ist oft von großem Nutzen für die Forschung gewesen, wenn auch nur dadurch, daß sie zu neuen Beobachtungen den Anstoß gab. Geitel¹²⁸⁾ sagt 1901 mit Recht: „Jedesmal, wenn neuerworbene Kenntnisse der allgemeinen Elektrizität gewonnen wurden, hat man nicht gezögert, sie auf die atmosphärische Elektrizität anzuwenden, so die unipolare Induktion des Erdmagnetismus, die photoelektrischen Einflüsse des Sonnenlichts, thermoelektrische Vorgänge in der Atmosphäre, die Kathodenstrahlung⁴⁾, und, wie man jetzt hinzufügen könnte, die radioaktiven Erscheinungen und die durchdringende Strahlung. In demselben Vortrag formuliert Geitel das Gewitterproblem folgendermaßen: „Die weit verbreitete Ansicht, daß der elektrische Prozeß im Gewitter auf eine Ausgleichung schon vorher bestehender Spannungsunterschiede beruhe, ist falsch. Vielmehr muß die Elektrizitätsentwicklung in einer Verbindung mit der Bildung und

¹²⁸⁾ H. Geitel, Über die Anwendung der Lehre von den Gasionen auf die Erscheinungen der atmosphärischen Elektrizität. Vortrag auf der 73. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte. Hamburg 1901.

Bewegung der Niederschläge stehen." Das Rätsel der Gewitterelektrizität wird gelöst sein, sobald die Natur dieser Vorgänge festgestellt ist.

1. Elektrisierung durch die Sonne

Die Sonnenwirkung spielt in den Theorien der Luft- und Gewitterelektrizität eine große Rolle. Es sind meistens führende Männer gewesen, denen sich eine solche Vorstellung aufdrängte. Der erste, der eine solche Theorie entwickelte, scheint Becquerel (1872) gewesen zu sein. Er glaubte, daß aus der Sonnenatmosphäre dauernd positiv geladener Wasserstoff ausgesandt werde, der durch kosmischen Staub der Erde diese positive Elektrizität übermittelt. Auch W. Siemens (1883) hielt die Sonnenatmosphäre für stark positiv elektrisch. Die Erde und die anderen Planeten sollten sich durch Influenz negativ aufladen, und zwar auf der Nachtseite, während auf der Tagseite die entgegengesetzte positive Influenzladung durch die Sonnenstrahlung fortgeschafft wird. Die Gewitter sollten wiederum durch Influenz von der Erde aus erklärt werden. Linss⁴⁸⁾ spricht zum ersten Male von der Möglichkeit eines „extratellurischen Zuflusses negativer Elektrizität“. Arrhenius¹²⁹⁾ urteilte damals recht pessimistisch über eine solche Entstehung des luftelektrischen Feldes und will sie zu denjenigen Problemen zählen, „die so gut wie vollkommen außerhalb des Bereichs der Naturforschung fallen“. Mehr als ein Jahrzehnt später führt er jedoch den Gedanken aus, daß negative Teilchen durch den Lichtdruck der Sonne fortgetragen werden und die Atmosphäre der Himmelskörper dadurch negativ aufladen. Simpson¹³⁰⁾ machte schon damals den Versuch, die luftelektrischen Erscheinungen durch eine Kathodenstrahlung der Sonne zu erklären. Neuerdings haben dann Swann und v. Schweidler die Möglichkeit erörtert, daß das elektrische Feld der Erde durch eine sehr durchdringende β - oder γ -Strahlung der Sonne verursacht wird. Eine scheinbar unüberwindliche Schwierigkeit liegt aber darin, daß diese Strahlung, um den ungeheuren Weg durch die Erdatmosphäre gegen das elektrische

**) Siehe Seite 52.

¹²⁹⁾ S. Arrhenius, Über den Einfluß der Sonnenstrahlung auf die elektrischen Erscheinungen in der Atmosphäre. Meteorol. Zeitschr. 5, 297 u. 348 (1888).

¹³⁰⁾ Näheres, sowie Literatur findet sich bei K. Kähler, Die Aufrechterhaltung der negativen Erdladung. Meteorol. Zeitschr. 38, 199 (1921).

Feld zurücklegen zu können, quantitativ ganz andere Eigenschaften haben müßte, als sie bisher in der Physik experimentell gefunden worden sind.

Für die Bildung der Gewitter macht Arrhenius im Jahre 1888 zum Teil die ultraviolette Strahlung der Sonne verantwortlich. Nachdem Hertz (1887) die ultraviolette Wirkung des Funkeninduktors entdeckt und Hallwachs¹³¹⁾ seine Versuche über die Zerstreuung negativ geladener Leiter durch das Licht ausgeführt hatte, haben Elster und Geitel¹³²⁾ die Messungen auf die atmosphärischen Vorgänge angewandt. Jedoch kommt eine Hallwachswirkung der Sonne auf die Erde deswegen nicht in Betracht, weil dabei ein negativer Überschuß der Luftladungen herausspringen würde, während bekanntlich die Messungen einen positiven ergeben. Im Jahre 1897 hat Brillouin¹³³⁾, gestützt auf Versuche von Buisson, wonach das ultraviolette Licht auf Eis sehr kräftig wirkt, eine Theorie der Luft- und Wolkenelektrizität aufgestellt, der die Sonnenwirkung auf die Cirruswolken zugrunde liegt. Durch die Hallwachswirkung verlieren die Cirren negative Elektrizität und laden sich daher positiv auf. Die negativen Ladungen werden durch die oberen Luftströmungen fortgetragen. Obolensky¹³⁴⁾ hat in Heidelberg die Versuche Buissons wiederholt. Bei reinem Wasser fand sich nur bei den kleinsten Wellenlängen eine deutliche Hallwachswirkung. Zusätze zum Wasser gaben teils eine geringe Vermehrung, teils wie beim Kochsalz eine geringe Verminderung des Effekts. Eis zeigte eine 200 bis 300 mal größere Wirkung als Wasser, beim Anfeuchten des Eises ging die Wirkung zurück. Obolensky zieht aus seinen Versuchen folgende Schlüsse für die Atmosphäre: „Die Bestrahlung von Wasserteilchen hat kaum praktische Bedeutung. Die Wasserwolken liegen zu tief, als daß das wirksame Wellengebiet noch bis zu ihnen gelangen könnte. Das gilt

^{m)} W. Hallwachs, Über den Einfluß des Lichts auf elektrische, statisch geladene Körper. Wiedemanns Annalen 33, 301 (1888).

¹³²⁾ J. Elster und H. Geitel, Beobachtungen des atmosphärischen Potentialgefälles und der ultravioletten Sonnenstrahlung. Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften IIa, 101, 703 (1892).

¹³³⁾ Brillouin, Ursprung, Schwankungen und Störungen der atmosphärischen Elektrizität. Ciel et Terre 18, 359 (1897). Referat Meteorol. Zeitschr. 15, 38 (1898).

¹³⁴⁾ W. Obolensky, Licht elektrische Wirkung auf Wasser, wässrige Lösungen und Eis mit Rücksicht auf die meteorologischen Erscheinungen. Meteorol. Zeitschr. 29, 497 (1912).

erst recht für die Ozeane. Wesentlich anders müssen sich die Cirruswölken verhalten, vor allem die in großen Höhen. Dadurch gewinnt die Hypothese Brillouins eine gesicherte Grundlage. An Gletschern kommt sie aber höchstens für die größten Gebirge in Betracht." Es ist aber nun nicht anzunehmen, daß der lichtelektrischen Wirkung an den Eiswolken eine allzu große Bedeutung zukommt. Das ist schon deswegen nicht möglich, weil die Schneeladungen sich in Mitteleuropa weit häufiger als negativ geladen erweisen und nicht als positiv, wie es die Brillouinsche Vorstellung verlangt. Etwas dunkel bleibt in dieser Vorstellung auch die Rolle der fortgewehten negativen Ladungen. Sie müßten sich, um elektrische Felder erzeugen zu können, wohl erst an andere Teilchen anlagern, die aber in großen Höhen außer anderen Eisteilchen kaum vorhanden sind. Mit solchen Annahmen quantitativ so starke Felder, wie sie ein Blitz verlangt, erklären zu wollen, ist wohl ein Ding der Unmöglichkeit.

2. Elektrische Vorgänge beim Anlagern (durch Adsorption) der Träger

Seitdem im Jahre 1899 Elster und Geitel¹³⁵⁾ die atmosphärische Elektrizität durch das stete Vorhandensein positiver und negativer Ionen (Elektrizitätsträger) in der Luft erklärten, hat die Frage der Adsorption dieser Träger die Forscher viel beschäftigt. Wenn ein geladener Körper der freien Luft ausgesetzt wird, so verliert er bekanntlich seine Ladung dadurch, daß die Träger des entgegengesetzten Vorzeichens aus der Luft an ihn heranwandern. Fraglich ist nun, ob ein solches Heranwandern auch dann eintritt, wenn der Körper ungeladen ist. Der englische Physiker Zeleny¹³⁶⁾, der als erster diesen Vorgang untersuchte, ließ gegen einen isolierten Leiter Luft strömen, die durch Röntgenstrahlen leitend gemacht worden war. Dabei lud sich der Körper wegen der größeren Beweglichkeit der negativen Träger negativ auf. Elster und Geitel wandten dies auf die

¹³⁵⁾ J. Elster und H. Geitel, Über die Existenz elektrischer Ionen in der Atmosphäre. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* 4, 213 (1899).

¹³⁶⁾ J. Zeleny, Über das Verhältnis der Geschwindigkeiten der beiden Ionen, welche in Gasen durch Röntgenstrahlen erzeugt werden. *Philosophical Magazine* (5) 46, 120 (1898).

Atmosphäre an. Die Erdladung sollte entstehen durch die stärkere Adsorption der negativen Träger am Erdboden, vor allem in Hohlräumen und an den Pflanzen. Ebert¹³⁷⁾ zeigte jedoch, daß diese Vorstellung nicht haltbar ist, weil der Versuch Zelenys nur dann gelingt, wenn die Luft von hoher zu schwacher Ionisierung strömt. Andere Physiker, so Villari und Simpson fanden keine Ladung oder auch wohl positive Aufladung isolierter Metallkörper. Ebert und Evers wiesen aber nach, daß ein leitendes Gas, das langsam durch enge Röhren oder Kanäle fließt, mehr negative als positive Ladung abgibt. Deswegen verlegt Ebert die Adsorptionswirkung in die Erdkapillaren, durch welche die radioaktive Emanation der Bodenluft dauernd, wie die Messungen zeigen, mit einem Überschuß an positiven Trägern in die Außenluft dringt, während sie negative an die Erde abgibt. Diese Anschauung gilt noch heute, wenn es auch recht zweifelhaft geworden ist, ob dieser Vorgang imstande ist, die Elektrisierung über den Ozeanen und in größerer Höhe über dem Erdboden zu erklären.

Nun ist es klar, daß die Adsorption auch in der freien Atmosphäre eintreten kann, in welcher eine dauernde Berührung zwischen positiven und negativen Ladungen einerseits und allen in der Luft enthaltenen Fremdkörpern, wie Staubteilchen, Kondensationskernen, Wasserdampf, Nebeltröpfchen und den Regentropfen, sowie festen Kondensationsprodukten anderseits eintreten muß. Schon Elster und Geitel nahmen an, daß in weitem Maße ein Anlagern der Träger an die Dunst- und Nebelteilchen stattfindet. Ihre eigenen Messungen des Potentialgefälles in solchen Schichten, sowie die späteren Beobachtungen des Leitvermögens und der Trägerbeweglichkeit bestätigen diese Auffassung vollauf. Nur tritt dabei keine Trennung der Elektrizitäten ein, weil beide Trägersorten davon betroffen werden, die negativen allerdings immer etwas mehr infolge ihrer größeren Beweglichkeit.

Auch die Adsorption an den fallenden Regentropfen bringt keine große Trennung der Elektrizitäten zustande. Zwar glaubte Schmauß¹³⁸⁾ bei Tropfen, die durch künstlich ionisierte Luft fielen, eine wesentliche

¹³⁷⁾ H. Ebert, Über die Ursache des normalen atmosphärischen Potentialgefälles und der negativen Erdladung. Physikal. Zeitschr. 5, 135 (1904). Bemerkungen dazu von G. C. Simpson 5, 325 u. 734 (1904). Erwiderungen von H. Ebert 5, 499 (1904) u. 6, 825 (1906).

¹³⁸⁾ A. Schmauß, Aufnahme negativer Elektrizität aus der Luft durchfallende Wassertropfen. Annalen der Physik, 4. Folge 9, 224 (1902).

Wirkung gefunden zu haben, doch zeigte Seeliger¹³⁹⁾, der einige Jahre später die Versuche am gleichen Ort wiederholte, daß nur 0,5% der in der Fallinie vorhandenen negativen Träger adsorbiert werden. Beim Abstellen der ionisierenden Röntgenröhre hörte die Adsorption sofort ganz auf. Lehnhardt¹⁴⁰⁾ wiederholte die Seeligerschen Versuche mit allen Vorsichtsmaßregeln. Er fand wieder etwas stärkere Adsorption, 6% aller im Fallraum vorhandenen negativen Träger beungeladenen Tropfen. Waren die Tropfen geladen, so adsorbierte ein positiver Tropfen mehr negative Träger als ein negativer Tropfen positive, und zwar stehen die Zahlen der adsorbierten Träger dann in ungefähr demselben Verhältnis zueinander wie ihre Beweglichkeiten.

Die Adsorption an den fallenden Tropfen ist also in der Tat vorhanden. Ungeladene Tropfen werden sich schwach negativ aufladen; bei geladenen Tropfen werden die positiven etwas stärker geschwächt. Wäre aber der Vorgang sehr merklich, dann müßte er vor allem bei ruhigem Regen eintreten. Dann sind aber gerade, wie die Messungen der Niederschlagselektrizität ergeben, die positiven Tropfenladungen am häufigsten. Praktisch spielt der Effekt also keine Rolle.

3. Elektrische Vorgänge beim Verdampfen und Verdichten des Wassers

a) **Das Verdampfen,** Die Beobachtungsergebnisse haben immer wieder dazu geführt, dem Wasserdampf einen bedeutenden Einfluß bei den elektrischen Vorgängen der Atmosphäre zuzuschreiben. Ursprünglich erblickte man in der Verdampfung als solcher schon eine Elektrizitätsquelle. Führende Gelehrte wie Volta, Laplace, Lavoisier haben an diese Elektrisierung geglaubt, von luftelektrischen Forschern vor allem Palmieri. Nachdem es durch Laboratoriumsversuche recht zweifelhaft geworden war, ob diese Vorstellung richtig sei — auch heute ist eine Elektrisierung durch Verdampfen nirgends nachgewiesen —, nahm man ein Mitführen (Konvektion) der Elektrizität durch den Dampf aus der Flüssigkeitsoberfläche an. Peltier, der in

¹³⁹⁾ R. Seeliger, Über Ionenadsorption an fallenden Wassertropfen. *Annalen der Physik*, 4. Folge 31, 500 (1910).

¹⁴⁰⁾ R. Lehnhardt, Ionenadsorption an fallenden Tropfen und Stahlkugeln. *Annalen der Physik* (4) 42, 45 (1913).

der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts diese Vorstellung begründete, war in der Tat imstande, die damaligen Beobachtungstatsachen damit zu erklären. Die Peltiersche Theorie hat weiteste Verbreitung dadurch gefunden, daß F. Exner¹⁴¹⁾ in Wien sie aufnahm, mathematisch formulierte und durch neue Versuche, sowie durch eine Fülle von wertvollen Beobachtungen aus allen Erdteilen zu stützen suchte. Peltier ging aus von der negativen Erdladung, der eine positive Ladung „im Himmelsraum“ gegenüberstehe. Das von der Erdoberfläche verdampfende Wasser sollte negative Ladung mit in die Höhe tragen, so daß also die Wolken negativ geladen wären. Erst durch Influenzvorgänge sollten auch positive Ladungen entstehen. Diese Peltier-Exnersche Vorstellung galt noch in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts allgemein. Auch Elster und Geitel deuteten ihre ersten Messungen über die Nieder Schlagselektrizität, die einen negativen Überschuß ergaben, als eine Bestätigung der Exnersehen Ansicht.

Die Vorstellung wurde aber bald unhaltbar, schon wegen ihrer experimentellen Grundlage. Bereits Faraday hat hervorgehoben, daß weder Luft noch Dampf allein elektrisch werden kann. Auch das Austreten des Dampfes kann keine Elektrizität erzeugen. Die vielfach schon von Peltier und Mascart, dann vor allem von Lecher¹⁴²⁾ und Pellat¹⁴³⁾ zur Stütze der Theorie ausgeführten Laboratoriumsversuche wurden bald angefochten. Schon im Jahre 1883 zeigte Blake¹⁴⁴⁾, daß Dämpfe, die aus ruhigen Flüssigkeitsoberflächen aufsteigen, ungeladen sind. Kalischer¹⁴⁵⁾ fand an dem Wasserdampf der Luft im Freien wie im Zimmer keinerlei Ladung; ebenso wenig

¹⁴¹⁾ F. Exner, Über die Ursachen und Gesetze der atmosphärischen Elektrizität. Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften IIa, 93, 222 (1886) sowie später: Neuere Untersuchungen auf dem Gebiet der atmosphärischen Elektrizität. Meteorol. Zeitschr. 17, 529 (1900).

¹⁴²⁾ E. Lecher, Über Konvektion der Elektrizität durch Verdampfen. Wiener Sitzungsberichte IIa, 96, 103 (1887).

¹⁴³⁾ W. Trabert, Neuere Versuche von Pellat zur Stütze der Exnerschen Theorie der Lufterlektrizität. Meteorol. Zeitschr. 16, 377 (1899).

¹⁴⁴⁾ L. J. Blake, Über die Elektrizitätsentwicklung bei der Verdampfung und über elektrische Neutralität des von ruhigen elektrischen Flüssigkeitsoberflächen aufsteigenden Dampfes. Wiedemanns Annalen 19, 518 (1883).

¹⁴⁵⁾ S. Kalischer, Über die Frage, ob bei der Kondensation von Wasserdampf eine Elektrizitätserregung stattfindet. Wiedemanns Annalen 20, 614 (1883).

konnte Sohncke¹⁴⁶⁾ eine Elektrisierung des Dampfes nachweisen. Schwalbe¹⁴⁷⁾ verfolgte das Verdampfen auf einer mit einem Quadrantenelektrometer verbundenen, mit heißem Wasser gefüllten positiv oder negativ aufgeladener Schale. Dabei ergab sich kein Unterschied zwischen wassergefüllter und leerer Schale. Es würde sich wohl lohnen, diese verhältnismäßig primitiven Messungen mit verbesserten Hilfsmitteln zu wiederholen. Daß Pellat doch eine Wirkung erhielt, schiebt Schwalbe auf die nicht ganz reinen Versuchsbedingungen, vor allem auf Verunreinigungen der Schale.

Nun hat Trabert¹⁴³⁾ überdies durch Rechnung gezeigt, daß, selbst wenn die Tröpfchen beim Verdunsten von der Erdoberfläche ihre Ladung mitnehmen würden, dies auf keinen Fall ausreichen würde, um die wirklich gemessene Elektrizitätsverteilung zu erklären. Ganz fallen gelassen mußte die Peltier-Exnersche Vorstellung werden nach den Meßergebnissen der Ballonfahrten in den neunziger Jahren. Nachdem schon W. Thomson (Lord Kelvin) auf die Bedeutung solcher Messungen hingewiesen hatte, war es Exners Verdienst, daß sie zustande kamen. Diese Messungen ergaben nun zweifellos eine Abnahme des positiven Potentialgefälles mit der Höhe, also einen positiven Überschuß der Luftladungen, während die Exnersche Ansicht einen negativen verlangt.

b) Das Verdichten. Einen neuen Antrieb erfuhren die Betrachtungen über Elektrisierung und atmosphärischen Wasserdampf durch Versuche des englischen Physikers C. T. R. Wilson¹⁴⁸⁾. Kühlt man in einem Glasgefäß schnell gesättigten Wasserdampf ab, so tritt an den Glaswänden Kondensation ein. W. Thomson zeigte, daß

¹⁴⁶⁾ L. Sohncke, Beiträge zur Theorie der Lufterlektrizität. Wiedemanns Annalen 34, 925 (1888).

¹⁴⁷⁾ G. Schwalbe, Über das elektrische Verhalten des von elektrisierten Flüssigkeiten aufsteigenden Dampfes. Wiedemanns Annalen 58, 500 (1896) und: Über die experimentelle Grundlage der Exnersehen Theorie der Lufterlektrizität. Annalen der Physik (4. Folge) 1, 294 (1900).

¹⁴⁾ Siehe Seite 110.

¹⁴⁸⁾ C. T. R. Wilson, Die Kondensation des Wasserdampfs in Gegenwart von staubfreier Luft und in anderen Gasen. Proceedings of the Royal Society 61, 240 (1897). Philosophical Transactions of the R. Soc. **189**, 265 (1897). Auszug: Meteorol. Zeitschr. 14, 217 (1897); ferner Proc. Roy. Soc. 64, 127 (1898) und vor allem: Die relative Wirksamkeit der positiv und negativ geladenen Ionen als Kondensationskerne. Proc. Roy. Soc. 65, 289 (1899).

dabei im Innern weitgehende Übersättigung eintritt, weil die Dampfspannung über einer konvex gekrümmten Oberfläche, dem Tropfen, größer ist als über einer ebenen, mit dem Wasserdampf im Gleichgewicht befindlichen. Solange die Tröpfchen in Berührung sind mit dem gesättigten Dampf, muß an ihrer Oberfläche Verdampfung eintreten bis zur völligen Aufzehrung der Tröpfchen. Coulier¹⁴⁹⁾ fand 1874, daß dampf gesättigte gewöhnliche, also kernhaltige Luft, die vorher komprimiert und dann plötzlich ausgedehnt wurde, sich bei dieser plötzlichen Abkühlung nebelartig verdichtet. Diese Eigenschaft der Luft, sich an den sogenannten „Kondensationskernen“ zu verdichten, benutzte dann Aitken zum Bau seines „Staub-“ oder besser „Kernzählers“ (S. 49). Wilson wies nun nach, daß die Kondensation auch in staubfreier Luft erfolgen kann. Er machte vorher die Luft kernfrei, indem er wiederholt durch plötzliche Ausdehnung Wolken bildete, bis jede sichtbare Kondensation aufhörte. Wurde nun diese kernfreie Luft plötzlich stark ausgedehnt, so zeigte sich regenartige Kondensation, sobald der Betrag des Endvolumens v_2 zum Anfangsvolumen v_x den

Wert $\frac{v_2}{v_1} = 1,25$ überschritt. Dieses Volumenverhältnis bedeutet 4fache

Übersättigung, d. h. eine relative Feuchtigkeit von 400 %. Die Kerngröße beträgt dann $8,6 \times 10^{-8}$ cm Durchmesser. -Bei noch größerer Übersättigung geht die Kondensation zwar noch weiter, gibt aber

keine sichtbare Zunahme der Tropfenzahl. Sobald jedoch $\frac{v_2}{v_1}$ größer

als 1,38 wurde, also 6fache Übersättigung überschritten wurde, entstand wieder eine Wolke bei enormer Vergrößerung der Tropfenzahl. Die Kerne haben dann die Größe $6,4 \times 10^{-8}$ cm. Bei weiteren Versuchen, bei denen er die kernfreie Luft durch Röntgenstrahlen stark leitend machte, zeigte dann Wilson, daß die Verdichtung bei 4facher Übersättigung an den negativen, bei 6 facher an den positiven Ladungen der leitenden Luft vor sich geht.

Diese Versuche Wilsons fanden in England große Beachtung. Townsend und J. J. Thomson benutzten die Methode, um die Elementarladung der Träger zu messen. J. J. Thomson¹⁵⁰⁾ wies auch

¹⁴⁹⁾ Coulier, Über eine neue Eigenschaft der Luft. Journal de Pharmacie et de Chimie 22, 165 (1875), zitiert nach Gerdien.

¹⁵⁰⁾ J. J. Thomson, Über die elektrische Ladung der durch Röntgenstrahlen erzeugten Ionen. Philosophical Magazine (5) 46, 528 (1898).

schon auf die Bedeutung der Versuche für die atmosphärischen Vorgänge hin. In Deutschland lenkten Elster und Geitel¹⁶⁵⁾ die Aufmerksamkeit auf die Wilsonschen Messungen. Wenn auch in der Atmosphäre die Kondensation zuerst an den negativen Trägern eintritt, dann ist die Wolke aufzufassen als ein Gemisch von negativ geladenen Tröpfchen mit Luft, die freie positive Ladungen enthält. Nach außen kann sie dabei unelektrisch sein. Das ändert sich aber, wenn die negativen Tropfen zu fallen beginnen. Die negative Erdladung würde dann durch diese Ladungen entstehen, wie überhaupt das elektrische Feld der Erde auf Kosten der Energie der fallenden Tropfen zustande käme. Wenn später auch an den positiven Trägern Kondensation eintritt, dann müßten zwischen den beiden Wolken-schichten elektrische Entladungen stattfinden können.

Mit großem Nachdruck hat Gerdien¹⁵¹⁾ diese Anschauungen vertreten und weiter ausgebaut, so daß sie seitdem in der Literatur meistens als Wilson-Gerdiensche Kondensationstheorie bezeichnet werden. Gerdien betont mit Recht, daß alles mit Notwendigkeit auf eine Elektrizitätstrennung nicht, wie man damals vielfach noch glaubte, am Erdboden, sondern in den oberen Luftschichten hindeutet. Kondensation tritt im aufsteigenden Luftstrom ein durch adiabatische Ausdehnung und Abkühlung, und zwar weniger in den großen Tiefdruckgebieten mit ihren verhältnismäßig kleinen Aufstiegeschwindigkeiten der Luft als in den sommerlichen Cumulus- und Cumulo-nimbus-Wolken, also vor allem in den Böen und Frontgewittern. Zu großen Vertikalgeschwindigkeiten kommt es besonders dann, wenn schon eine Wolkenbildung erfolgt ist und die freiwerdende Kondensationswärme des Wasserdampfs der Luft erneuten Auftrieb gibt. Die Kondensation geht zunächst an den Kernen vor sich, das gibt die Basis der gewöhnlichen Cumuli. Durch Anlagern von Tropfen an schon geladene Kerne kann hier auch schon eine geringe elektrische Ladung der Wolke zustande kommen. In der Wolke selber wird die Ausfällung der Kerne vollkommen sein, die Wolke wird vielfach lichter. Außerhalb und oberhalb der Wolke verhindern instabile Luftschichten

¹³⁵⁾ Siehe Seite 107.

¹⁵¹⁾ H. Gerdien, Die Kondensation des Wasserdampfs an den Ionen und ihre Bedeutung für die Physik der Atmosphäre. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 1, 24 (1904). — Der Elektrizitätshaushalt der Erde und der unteren Schichten der Atmosphäre. Physikal. Zeitschr. 6, 647 (1905).

das Vordringen der stark kernhaltigen unteren Luftmassen in hohe Schichten, es kann sogar staubfreie Luft aus der Höhe heruntergeführt werden. Durch die Sonne wird aber die stabile Schichtung unterbrochen werden können, der aufsteigende Luftstrom dringt hindurch, besonders rasch dann, wenn er wieder auf eine Schicht mit adiabatischem Temperaturgefälle stößt. Die Folge ist eine starke Übersättigung und damit eine plötzliche Kondensation an den negativen Trägern, unterhalb der 0° -Isotherme in Form von grobtröpfigem Regen, oberhalb 0° in fester Form. Gerdien schätzt die Höhe, in der das vor sich geht, zu etwa 4000 bis 5000 m, wo erfahrungsgemäß etwa eine elektrostatische Einheit Elektrizität im Kubikmeter, das sind 3×10^9 Träger in der Luft enthalten sind. Da nach Conrad³⁴⁾ die Wolke, wenn sie dicht ist, etwa 5 g Wasser im Kubikmeter enthält, ergäbe das für 5 g Niederschlagsmenge eine Ladung von einer elektrostatischen Einheit, eine Größenordnung, die mit den von Gerdien bei seinen Messungen der Niederschlagslektrizität und -menge gefundenen Werten übereinstimmt. Nach der Kondensation an den negativen steigen die positiven Träger der Luft weiter in die Höhe, allerdings behindert durch das starke Feld, das sich jetzt zwischen beiden Trägerschichten bildet. Nach Erreichung der 6 fachen Übersättigung kann auch bei ihnen Kondensation eintreten; doch ist das für die Erklärung der Erscheinungen nicht nötig. Die Entfernung zwischen den beiden verschieden geladenen Schichten schätzt Gerdien zu nur einigen Hundert Metern, so daß die Feldstärke recht hoch wird. Die Vertikalbewegung, die nötig wäre, um die positiven Träger gegen dieses Feld fortzutragen, wäre etwa 10 m/sec. Nach unten zu wirkt das Feld ebensowenig wie eine Cumuluswolke. Erst wenn die Niederschläge fallen, treten auch am Erdboden starke Felder auf, doch stellt sich nach dem Regen recht bald wieder das normale Feld her. Die auftretende elektrische Energie bildet nach Gerdien nur einen Bruchteil der Gravitationsenergie der Niederschläge und nur einen ganz verschwindenden Teil der gesamten kinetischen und thermischen Energie des Kondensationsvorgangs. Die geringen Ladungen bei Landregen erklären sich daraus, daß hier die Verdichtung des Wasserdampfes fast nur an den Kernen erfolgt, die hohen bei Böen und Gewittern durch die Kondensation an den negativen Trägern. Die negativen gelangen auf diese Weise zur Erde, während die positiven zu großen Höhen emporgetragen werden.

³⁴⁾ Siehe Seite 42.

Der hier geschilderte Vorgang kann nun durch mancherlei Umstände abgeändert werden, so durch die horizontalen Luftbewegungen, durch Änderungen in der Vertikalbewegung wie Hineingeraten in eine absteigende Strömung, durch Wirbelbildungen vor allem beim Durchbrechen von stabilen Schichten, durch Zusammenfließen und Ladungsabgabe von Tropfen, sowie durch das Verdunsten der Tröpfchen und der festen Niederschlagsteilchen. Neben der Wiedervereinigung der Ionen hält Gerdien auch die Bildung neuer durch Ionenstoß im starken Feld für möglich. Dadurch wird im aufsteigenden Luftstrom immer neue Kondensation eintreten können, so daß auf diese Weise eine erhebliche Verstärkung des Feldes zustande kommt.

Die Wilson-Gerdiensehe Theorie hatte vor 15 Jahren eine gewisse allgemeine Gültigkeit erlangt; selbst die Anhänger anderer Vorstellungen ließen die Mitbeteiligung der Kondensationsvorgänge an den elektrischen Prozessen der Atmosphäre durchaus gelten. Wilson¹⁵²⁾ sah sie übrigens auch nur als mitwirkenden Faktor, nicht als alleinige Ursache an. Bedenken gegen die unbeschränkte Anwendung der Wilsonschen Laboratoriumsversuche auf die Atmosphäre kamen allerdings schon am Anfang der Entwicklung auf. So bezweifelte Aitken¹⁵³⁾ die vollkommene Trennung der kernhaltigen Luft von den Ionen. Einerseits müßten diese genau wie Kerne bei der ersten Kondensation im Cumulus zurückgehalten werden, anderseits enthält die Luft oberhalb der Wolken stets noch Kerne genug, sie können sogar durch die Sonne neu gebildet werden, so daß weiterhin die Verdichtung des Wasserdampfes an ihnen und nicht an den negativen Trägern erfolgt. Wigand¹⁵⁴⁾ erhielt neuerdings als Mittel von 14 Ballonfahrten folgende Verteilung der mit dem Aitkenschen Zähler gemessenen Kerne:

0— 200 m Höhe	44 000 im cm ³
200— 400 „ „	2 1 000 „ „
400— 600 „ „	13 000 „ „
800—1000 „ „	6 500 „ „
1000—1500 „ „	3 200 „ „

¹⁵²⁾ C. T. R. Wilson, Über Gewitterelektrizität. Philosophical Magazine (6) 17, 634 (1909).

¹⁵³⁾ J. Aitken, Atmosphärische Elektrizität, Nature (London) 61, 514 (1899 u. 1900) u. 62, 366 (1900).

¹⁵⁴⁾ A. Wigand, Die vertikale Verteilung der Kondensationskerne in der freien Atmosphäre. Annalen der Physik (4. Folge) 59, 689 (1919).

1500—2000 m Höhe	900 im cm ⁸
2000—2500 „ „	450 „ „ ⁹⁹
2500—3500 „ „	200 „ „ ⁹⁾
3500—4500 „ „	110 „ „
4500—5500 „ „	50 „ „
5500—7500 „ „	etwa 20 „ „
7500—9500 „ „	etwa 5 „ „

Diese Verteilung erklärt sich dadurch, daß die Kerne in der Hauptsache am Erdboden entstehen und, wenn sie durch die Luftströmungen nach oben gelangen, doch infolge ihrer Schwere wieder zu Boden sinken. Im einzelnen weicht die Verteilung oft stark von diesen Mitteln ab, es kann z. B. in mittleren Höhen die Kernzahl bedeutend größer sein. Je größer die Luftfeuchtigkeit ist, um so kleiner wird, wie schon Aitken fand, die Kernzahl. Offenbar sind die Kerne hygroskopisch, d. h. sie ziehen Wasser an und werden dadurch größer. In der Wolke sind sie kleiner, weil sie als Kerne für die Wolkenelemente, die Nebeltröpfchen, gedient haben. Bei der Auflösung der Wolke bleiben sie als Dunst zurück. Die Anzahl der Wolkenelemente im Kubikzentimeter ist von derselben Größenordnung wie die Anzahl der Kerne in der wolkenfreien Luft derselben Höhe. Wigand erwähnt eine Beobachtung, die einiges Licht auf die Kondensation wirft. In 9000 m Höhe entsteht durch das Ausatmen gegen die kalte Luft (etwa — 40°) starke Übersättigung und daher sofortige Nebelbildung.

Aitken zweifelt ferner an dem Vorhandensein eines wolkenfreien Raumes. Daß die elektrischen Vorgänge zwischen dem Cumulus (Kondensation der Kerne) und dem Cirrus (Kondensation an den negativen Trägern) erfolgen sollen, ist in der Tat meteorologisch unhaltbar. Hann betont immer wieder, und alle Wolkenbeobachtungen bestätigen das in vollem Umfange, daß ein Gewitter erst dann einsetzt, wenn der aufsteigende Cumuluskopf die Cirruskappe durchbrochen hat. Die Blitze treten ja auch nicht in einem freien Luftraum, sondern meistens mitten in der Wolke oder zwischen Wolke und Erde auf. Das ist vor allem durch die Walt er sehen Blitzaufnahmen exakt nachgewiesen worden. Im Gebirge sieht man die elektrischen Entladungen mitten in den Schnee- und Graupelwolken. Auch Simpson¹⁶⁵⁾ weist

¹⁶⁵⁾ G. C. Simpson, Über die Wilson-Gerdiensche Gewittertheorie.* Philosophical Magazine (6) 17, 619 (1908).

auf diesen Mangel der Theorie hin. Wegener*) sagt sogar: „Es ist anzunehmen, daß alle atmosphärische Kondensation gerade von derjenigen Art ist, wie sie bei den Wilsonschen Versuchen ausgeschaltet wurde/⁴ Geitel¹⁵⁰) bezweifelt ebenfalls die Anwendung der Versuche auf die Atmosphäre. Bei Wilson ist die Elektrizitätsscheidung in der ionisierten Luft nicht durch den kondensierten Wasserdampf eingetreten, sondern durch das angelegte elektrische Feld. In der Atmosphäre wäre eine räumliche Trennung keineswegs gewährleistet. Vielmehr würden die positiven Ionen zu den negativen Nebeltröpfchen wandern und deren Ladung neutralisieren, da die geringe Fallbewegung der Tröpfchen nicht hinreicht, sie schnell genug aus dem Bereich der positiven Ladungen zu entfernen.

Lenard⁴⁵) hat allgemein nachgewiesen, daß die Annahme einer Dampfkondensation auf den Elektrizitätsträgern Widersprüche mit der Erfahrung ergibt. Die Träger in den Dämpfen haben nicht die von der Thomsonsehen Theorie verlangte Größe, sondern sie sind wesentlich größer. Aber auch bei den kleinsten Größen, 7 bis 11 $\times 10^{-8}$ cm Durchmesser, tritt der Einfluß der elektrischen Ladung so wenig hervor, daß die bisherige Meßgenauigkeit nicht genügt, darüber zu entscheiden. Die leichtere Kondensation an den negativen Trägern entspricht lediglich ihrer größeren Wanderungsgeschwindigkeit. Andere als diese nur gering wirkenden Ursachen scheinen überhaupt nicht in Betracht zu kommen. Lenard faßt seine Ergebnisse dahin zusammen, daß elektrische und unelektrische Nebelkerne von gleicher Größe nicht entfernt den großen Unterschied in bezug auf Dampf kondensation zeigen, den man ihnen gewöhnlich zuschreibt und der in der weitverbreiteten Anschauung zum Ausdruck kommt, daß die Dampf kondensation hauptsächlich an „Ionen“ stattfindet.

Simpson betont in seiner Krilik von 1908 ferner, daß es gar nicht möglich ist, Felder von 30000 Volt/cm, wie sie bei Blitzentladungen auftreten müssen, durch die Kondensation zu erklären. Er schätzt, daß es über eine Stunde dauern müßte, bis sich ein Blitz bilden könnte; eine ganz unmögliche Annahme, da inzwischen durch viele

*) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre. Leipzig (J. A. Barth) 1911, S.75.

¹⁵⁶) H. Geitel, Zur Frage nach dem Ursprung der Niederschlagslektrizität. Physikal. Zeitschr. 17, 462 (1916).

⁴⁵) Siehe Seite 49.

andere Umstände, von allem durch die Wiedervereinigung der Träger, das Feld wieder geschwächt werden würde. Nach diesem einen Blitz wäre das Feld dann ganz erschöpft, weil keine neuen negativen Träger mehr da wären. Auch Seeliger¹⁷⁵⁾; zeigte durch Rechnung, daß durch die Kondensation an den negativen Ionen nur Felder von geringer Stärke, etwa von der Größenordnung 1000 Volt/m entstehen könnten. Die in der Atmosphäre wirkenden Ionisatoren sind nicht kräftig genug, um die vielen für die Blitzbildung nötigen Ionen zu erzeugen.

Ein ganz wunder Punkt in der Wilson- Ger dien sehen Vorstellung ist die Übersättigung. Schon Aitken bezweifelte, daß solche ungeheuren Übersättigungen, 400 und gar 600 % relative Feuchtigkeit, wie sie Wilson im Laboratorium herstellen konnte, in der Atmosphäre vorkommen können. Die größte mit Instrumenten in den Wolken beobachtete relative Feuchtigkeit ist die von Wagner³⁶⁾ auf dem Sonnblick (3100 m) gemessene von 107%. Daß die Nebeltröpfchen der Wolke stark unterkühlt sein können, ist eine bekannte Tatsache. Köhler¹⁵⁸⁾ hat in Norwegen noch bei -20° Wassertröpfchen beobachtet, Wegener⁴²⁾ in Grönland einmal einen weißen Regenbogen, der durch Tröpfchen entstanden sein mußte, bei -34° . Aber selbst diese Beobachtung würde nur eine Übersättigung der Tröpfchen in bezug auf Wasser von 142% bedeuten.

Die Wilson-Gerdiensche Theorie ist weiterhin nicht imstande, die hohen Ladungen der Tropfen und Schneeflocken zu erklären. Gerdien selbst maß in Göttingen nur Ladungen der Gewichtseinheit von etwa 1 elektrostatischen Einheit. Dagegen fanden später Weiß bis zu 35, Kahler 40, Simpson 20, Schindelbauer 35, Gschwend neuerdings an einzelnen Tropfen sogar über 200 elektrostatische Einheiten pro Volumeneinheit.

Schließlich ist noch die Folgerung, die J. J. Thomson und Ger dien aus der Theorie ableiteten, daß die negative Erdladung durch die überwiegend negativen Ladungen der Niederschläge hervor-

¹⁵⁷⁾ R. Seeliger, Elektrostatik aufsteigender Luftströme. Wiener Sitzungsberichte IIa, 125, 1167 (1916).

³⁵⁾ Siehe Seite 43.

¹⁵⁸⁾ H. Köhler, Über die Tropfengröße der Wolken und die Kondensation. Meteorol. Zeitschr. 38, 359 (1921).

⁴²⁾ Siehe Seite 45.

gerufen werde, durch die langen Registrierreihen von Potsdam und Simla (Indien) widerlegt worden. Die Wilson-Gerdiensche Kondensationstheorie kommt also heute für die Erklärung der Gewitterelektrizität nicht mehr in Betracht.

4. Reibungsvorgänge an den Niederschlägen

Schon in der Mitte des 18. Jahrhunderts findet sich in der Literatur der Gedanke, daß die Reibungs-oder Kontaktelektrizität für die Gewitter verantwortlich zu machen sei. Der deutsche Physiker Winkler hatte von einem Gewitter eine viel vernünftigeren Vorstellung als sein so berühmt gewordener Zeitgenosse Franklin. Bei der Verdunstung des Wassers sollte nach Winkler durch Reibung am Boden Elektrizität erzeugt werden. Erst seitdem Faraday seine berühmten Versuche über die Reibungselektrizität ausgeführt hatte, wurde wieder die Aufmerksamkeit auf solche Vorgänge zwischen Gasen und Dämpfen einerseits, flüssigen und festen Körpern anderseits gelenkt. Vor allem in den achtziger Jahren des 19. Jahrhunderts entstanden in Deutschland eine ganze Reihe von Gewittertheorien, die sich auf solche Vorstellungen aufbauten. Die Versuche Faradays wurden wiederholt, vor allem solche über die Reibung des Wassers. So zeigte Elster¹⁵⁹⁾, daß bei der Reibung von Wasser an verschiedenen festen Körpern das Wasser sich fast stets positiv elektrisiert. Auch Linss⁴⁸⁾ hat einige Messungen mit Schnee und Wasser in einem Zerstäuber ausgeführt, die wie alles bei ihm schon ganz modern anmuten. Durch Abtasten mit einem kleinen Flammenkollektor stellte er dabei sowohl positive wie negative Ladungen fest.

Hoppe¹⁶⁰⁾ geht in seiner Gewittertheorie auf Winkler zurück. Durch Reibung an der Erdoberfläche soll sich der Wasserdampf positiv, die Erde selbst negativ aufladen. In dem aufsteigenden Dampf tritt vor allem nach der Kondensation erneute Reibung ein, wodurch sich die Wolke stärker positiv, der Rand negativ elektrisiert. Jordan¹⁶¹⁾

¹⁵⁹⁾ J. Elster, Über die in freien Wasserstrahlen auftretenden elektromotorischen Kräfte. Wiedemanns Annalen 6, 553 (1879).

⁴⁸⁾ Siehe Seite 52.

¹⁶⁰⁾ E. Hoppe, Über atmosphärische und Gewitterelektrizität. Meteorol. Zeitschr. 2, 1 u. 100 (1885).

¹⁶¹⁾ K. F. Jordan, Zur Frage nach dem Ursprung der atmosphärischen Elektrizität. Meteorol. Zeitschr. 2, 406 (1885).

deutet die Vorzeichen ähnlich, sieht aber den Hauptprozeß in der Reibung beim Aufsteigen und Bewegen der verdampften Wasserteilchen an der trockenen Luft, wobei die Luft negativ, der Dampf positiv elektrisch werden soll. Andries¹⁶²⁾ glaubte an Reibung von Wasserteilchen, die negativ elektrisch werden sollten, an feuchter Luft, die dabei positive Ladung annehmen sollte. Linss⁴⁸⁾ deutete seine oben erwähnten Versuche als durch Reibung der Tropfen an Luft verursacht. Diese von Linss vorgeahnten Dinge haben später durch Lenards Arbeiten eine große Bedeutung erlangt. Die anderen Reibungstheorien sind mit Recht wieder in Vergessenheit geraten.

Dagegen spielt noch heute eine Reibungstheorie eine gewisse Rolle, die sich auf die Reibung von Wasser an Eis stützt. Schon Faraday hatte solche Versuche ausgeführt. Auf die atmosphärischen Vorgänge angewandt hat sie zuerst Luvini in Turin (1884), der annimmt, daß sich dabei das Wasser negativ, das Eis positiv elektrisiert. Dann hat Sohncke^{162a)} eine Theorie der Eisreibung in der Atmosphäre ausgebaut und sie durch Messungen, auch bei Ballonfahrten, zu stützen gesucht. Er wiederholte Faradays Versuche und zeigte, daß im Gegensatz zu allen anderen Körpern bei der Reibung an Wasser das Eis positiv elektrisch wird. Eine solche Reibung findet nun nach Sohncke vor dem Gewitter statt. Der Cirrusschirm beweist das Nebeneinanderbestehen von Wassertropfen und Eisnadeln am Kopfe des Cumulus. Dazu kommt noch die starke Reibung der fallenden Graupel- und Hagelkörner gegen die Wolkenelemente. Die Gewitterwolke wird demnach negativ elektrisch, die Eiswolke und der Hagel positiv. Die negative Erdladung wird wie bei der Kondensationstheorie durch die vorwiegend negativ geladenen Niederschläge erklärt, während in der Luft ein positiver Überschuß zurückbleibt. Sohncke hat auch die Schwankungen der normalen Lufterlektrizität durch regelmäßiges Heben und Senken der 0°-Isotherme in der Atmosphäre zu erklären versucht; dadurch wird jedesmal der Elektrisierungsvorgang des aufsteigenden

¹⁶²⁾ P. Andries, Über Gewitter- und Hagelbildung. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie* 12, 1 u. 65 (1884); 13, 125 u. 187 (1886).

«*) Siehe Seite 52.

^{162a)} L. Sohncke, Die Ursache der Gewitterelektrizität und der gewöhnlichen Elektrizität der Atmosphäre. Jena 1885. — Gewitterelektrizität und gewöhnliche Lufterlektrizität. *Meteorol. Zeitschr.* 5, 413 (1888). — Gewitterstudien auf Grund von Ballonfahrten. *Abhandlungen der bayerischen Akademie der Wissenschaften* 18, 591 (1894).

Luftstroms gegen die Cirrusregion in andere Höhen verlegt. Von diesen Folgerungen hat sich das meiste nicht bestätigt. Weder sind die Wasservolken vorwiegend negativ, noch ist der Schnee positiv, sondern es ist, wenigstens in Mitteleuropa, gerade umgekehrt. Nur die häufig positive Ladung von Graupeln und vor allem von Hagel trifft zu, und es ist daher wohl nicht von der Hand zu weisen, daß ein solcher Reibungsvorgang beim Fallen fester Niederschläge gegen flüssige stattfindet. Die Sohnckesche Vorstellung hat auch insofern recht, als sie den eigentlichen Sitz der Gewitterelektrizität in jene Luftschichten verlegt, in der Niederschläge in fester, körniger Form vorhanden sind. Neuerdings hat Schmauß⁴⁶⁾, von kolloidalen Betrachtungen ausgehend, wieder an die Sohnckesche Theorie erinnert. Wir haben es nach ihm bei den Gewittervorgängen mit zwei kolloidalen Systemen zu tun: Luft—Wasser und Luft—Eis, die besonders reaktionsfähig sind, zumal in einem so turbulenten Zustand, wie er in einer Gewitterwolke zu erwarten ist. Auch Gockel¹⁶³⁾ hält Reibungsprozesse, wie sie Sohncke annimmt, durchaus für möglich, weil nach den Beobachtungen auf den Berggipfeln, Säntis, Sonnblick und Zugspitze, so häufig feste und flüssige Nieder Schlagsteilchen nebeneinander im Gewitter vorkommen.

Vermutlich spielt sich aber der Vorgang doch dabei meistens anders ab. Schon Lenard¹⁸⁰⁾ betont, daß das Verhalten des Eises nur einen Sonderfall seiner Auffassung über die elektrische Doppelschicht in der Oberfläche flüssiger oder fester Körper darstellt. Neuerdings hat Kahler⁵²⁾ gezeigt, daß, wie allgemein bei der Staubreibung, auch bei Schneestaub die Elektrisierung genau so vor sich geht wie bei der Lenardwirkung des Wassers. Es handelt sich nur um eine Wechselwirkung zwischen Schnee und Luft. Durch Herausreißen kleinster Schneeteilchen laden sich diese negativ, der größere Rest dagegen positiv auf. Wirksam ist also allein ein Zerstäuben des Eises oder des Schnees. Bei den Versuchen mit Wasser und Eis kommt dazu noch das Zerstäuben des Wassers. Dadurch sind wahrscheinlich auch Elsters und Sohnckes Messungen beeinflußt worden. Kürzlich hat Stäger¹⁶⁴⁾

⁴⁶⁾ Siehe Seite 50.

¹⁶³⁾ A. Gockel, Zur Sohnckeschen Theorie der Gewitterelektrizität. Meteorol. Zeitschr. 40, 87 (1923).

¹⁸⁰⁾ Siehe Seite 131.

52)

Siehe Seite 57.

¹⁶⁴⁾ A. Gockel, Zur Erklärung der Gewitterelektrizität. Meteorol. Zeitschr. 40, 277 (1923).

solche Versuche mit verbesserter Apparatur wiederholt. Es wurde Staub gegen ein angefeuchtetes Metallgitter geblasen, das mit einem Elektrometer verbunden war, oder die Raumladung in einem angefeuchteten Drahtkäfig gemessen, gegen den der Staub geblasen wurde. Das Anfeuchten ist nötig, um eine Elektrisierung des Staubes am Gitter zu vermeiden. Die Versuche bestätigten, daß bei der Reibung von Eis an Eis der abfallende Eisstaub geladen ist. S tag er zeigte, daß dabei 1 g Substanz eine ebenso große oder noch größere Elektrizitätsmenge erhalten kann als beim Zerblasen des Wassers. Je feiner verteilt die Substanz ist, um so größer ist die Elektrisierung, also genau so, wie es die neuesten Messungen bei den Zucker- und Kohlenstaubexplosionen ergeben haben¹²³). Außer Eis und Schnee könnten also noch andere feste Fremdkörper der Luft die Wirkung zeigen und so die Elektrisierung verstärken. Ebenso wie beim Wasser würde der Effekt quantitativ ausreichen, um die beim Gewitter beobachteten Felder zu erklären. Voraussetzung dabei ist nur, daß die Luftbewegung in der Wolke genügend tumultuarisch ist. Die Bedingungen sind für die Zerstäubung der festen Teilchen nicht so genau festgelegt wie durch die Lenardsehen Messungen bei den flüssigen, wo eine merkliche Elektrisierung erst bei 11 m/sec Vertikalgeschwindigkeit eintreten kann. Nach den Beobachtungen von Kahler geht am Erdboden die Elektrisierung des Schneestaubes schon bei Horizontalgeschwindigkeiten von 10 m/sec gut vor sich. Hier handelt es sich aber um Schnee, der in großer Menge vom Boden aufgewirbelt wird. In der freien Atmosphäre, vor allem in dünnen Eiswaolen ist wohl eine viel geringere Wirkung zu erwarten. Vermutlich wird sie nicht größer sein als an den Wassertropfen, schon deswegen nicht, weil die viel leichteren Schneeflocken eher den Luftströmungen folgen können als die schwereren Wassertropfen.

5. Die Lenardwirkung in den Wolken

Im Jahre 1786 machte Tralles¹⁶⁵) in Bern die Entdeckung, daß in der Nähe von Wasserfällen ein Elektroskop negative Elektrizität in der

¹²³) Siehe Seite 100.

¹⁶⁶) W. Budig, Historisches zum Lenardeffekt. Meteorol. Zeitschr. 39, 284 (1922). — F. Loewe, Nochmals: Historisches zum Lenardeffekt. Meteorol. Zeitschr. 40, 115 (1923).

Luft anzeigt. Er stellte fest, daß sowohl der im freien Fall versprühte als auch der beim Aufprallen auf die Felsen abspritzende Wasserstaub negativ geladen war. Um diese Wirkung zu erklären, kommt Tralles zu ganz modern anmutenden Schlüssen. Er lehnt die Annahme ab, daß die Luftteilchen ihre Ladung dem Wasserstaub mitteilen, ebenso die Theorie der Verdampfung, die gerade damals von führenden Männern vertreten wurde. Vielmehr führt er die Elektrisierung auf die Reibung beim Aufprallen zurück. Er machte auch Laboratoriumsversuche, um diese Wirkung zu finden, die aber kein Resultat ergaben. Trotzdem später, als diese Arbeit von Tralles längst in Vergessenheit geraten war, von anderen Beobachtern die Erscheinung an Wasserfällen wiederholt gemessen wurde, vergingen mehr als 100 Jahre, bis der Vorgang aufgeklärt wurde. Lenards Arbeit darüber¹⁶⁶⁾ bedeutet einen Markstein auf dem Forschungswege. Lenard zeigte in einer bis ins Kleinste sorgfältig durchgeführten Experimentaluntersuchung, daß der von Tralles und anderen beobachteten Erscheinung eine ganz unerwartete Elektrisierung zugrunde liegt. Die Reibung des Wassers an dem festen Körper, auf den es fällt, spielt keine Rolle, denn es war gleich, auf welchen Körper es fiel, während Elster¹⁶⁹⁾ bei seinen Versuchen große Unterschiede bei der Reibung an Wasser gefunden hatte. Das Vorzeichen reinen Wassers war stets positiv; das entgegengesetzte negative fand sich stets an der von der Aufprallstelle entweichenden Luft. Die Trennung der Elektrizitäten ging niemals beim Fallen, sondern nur beim Aufprallen vor sich. Bloßes Zerstieben des Wassers war ebenso elektrisch unwirksam als das Durchfahren von Wasserstrahlen durch die Luft. Auftreffen getrennter Tropfen auf ein Hindernis gab dagegen größte Wirkung. Von wesentlichem Einfluß auf Stärke und Vorzeichen der Elektrisierung war eine Verunreinigung des Wassers. Eine schwache Kochsalzlösung kehrte zum Beispiel die Vorzeichen um.

Die Lenardwirkung, wie man die Erscheinung nach ihrem Entdecker bald nannte, wird in der Natur eine gewisse Rolle spielen. Außer an den Wasserfällen wird sie bei jedem Regen eintreten müssen, in umgekehrtem Sinn macht sie bei der Brandung des Meeres die Luft elektrisch. Doch sind diese Vorgänge nur von untergeordneter Be-

¹⁶⁶⁾ P. Lenard, Über die Elektrizität der Wasserfälle. Wiedemanns Annalen 46, 584 (1892).

¹⁵⁹⁾ Siehe Seite 119.

deutung. Sie werden schon beim Landregen und noch viel mehr bei Böen und Gewittern von stärkeren elektrischen Prozessen überdeckt. Lenard erklärte damals die Erscheinung durch das Zerreißen einer elektrischen Doppelschicht, die er an der Trennungsfläche des Tropfens von der ihn umgebenden Luft annahm. Beim Aufprallen entweicht die Luft so rasch von dem Tropfen, daß die negative Ladung der Luft keine Zeit mehr hat, sich mit der entgegengesetzten positiven des Wassers wieder zu vereinigen. Die Doppelschicht, die auf der Berührungselektrizität zwischen Gas und Flüssigkeit beruht, wird also mechanisch zertrennt.

Einen zweiten Markstein bildet eine 12 Jahre später erschienene Untersuchung Lenards¹⁶⁷⁾, die sich mit den mechanischen Vorgängen beim Regen befaßt. Die Größe der Regentropfen kann von zwei Umständen beeinflußt werden, einmal nach Reynolds von dem Anwachsen infolge verschiedenen Fallens der Tropfen. Dabei können sich größere und kleinere vereinigen. Nun fallen aber, wie Lenards Versuche beweisen, die Regentropfen nicht so sehr verschieden schnell; dagegen kann häufig ein Zusammenstoß fallender Tropfen mit den relativ ruhenden Wolkenelementen eintreten. Ebenso oft kommt Zusammenprall der Wolkenelemente unter sich vor, was wahrscheinlich erst Tropfenbildung und damit ein Regnen der Wolke möglich macht. Daß trotzdem nicht jede Wolke regnet, liegt daran, daß die Flüssigkeitsmassen beim Berühren ungerne zusammenfließen, weil die Luft zwischen ihnen erst entweichen muß. Es ist immer eine gewisse Kraft erforderlich, welche die Tröpfchen daran hindert, sich zu trennen. Wahrscheinlich sind das elektrische Kräfte.

Eine zweite Möglichkeit für die Vereinigung von Tropfen schafft nach Ferrel die Aufwärtsbewegung der Luft. Lenard hat die Bedingungen dafür genau festgelegt, indem er im Laboratorium Wassertropfen gegen einen aufwärts gerichteten Luftström fallen ließ und dabei Tropfengröße und Luftgeschwindigkeit veränderte. Die Tropfengröße maß er nach der Wiesnerschen Eosinpapiermethode¹⁶⁸⁾. Beim Fallen der Tropfen durch Luft tritt schließlich ein Gleichgewichtszustand zwischen Schwerkraft und Luftwiderstand ein. Bei kleinen

¹⁶⁷⁾ P. Lenard, Über Regen. Meteorol. Zeitschr. 21, 249 (1904).

¹⁶⁸⁾ J. Wiesner, Beiträge zur Kenntnis des tropischen Regens. Wiener Sitzungsberichte IIa, 104, 1397 (1895).

Luftgeschwindigkeiten v und kleinen Tropfen rührt der Widerstand nur von der inneren Reibung der Luft her und ist dann v proportional. Bei größeren Geschwindigkeiten tritt Wirbelbewegung ein, dann wird die Luftdicke maßgebend und der Widerstand v^2 proportional. Die Grenze zwischen diesen beiden Fällen liegt bei einer Tropfengröße vom Durchmesser 0,29 mm. Bei großen Tropfen und dauernd großen Geschwindigkeiten deformiert sich der Tropfen. Er kann dann einige Zeit schweben und dabei unter Umständen aus dem Luftstrom seitwärts herausgleiten. Sonst tritt nach 3 bis 5 Sekunden bei ruhigem Schweben ein Zerteilen des Tropfens ein, und zwar erfolgt das plötzlich in einem schönen Kranz kreisförmig angeordneter, gleichweit voneinander entfernter und gleich großer Tröpfchen, meist 7 bis 9. Bei unruhigem Schweben, und das ist das häufigere, wird das Zerteilen unregelmäßiger. Meist bilden sich dann viele Tröpfchen von etwa 1 mm Durchmesser und darunter. Sehr begünstigt wird das unregelmäßige Zerteilen durch das plötzliche Auftreffen bereits deformierter Tropfen auf einen schnelleren aufsteigenden Luftström. Kleinere Tropfen von 2 bis 4 mm Durchmesser bleiben bei ruhigem und unruhigem Schweben stets ganz. Größere Tropfen als etwa 5 mm kommen im Regen überhaupt nicht vor, weil sie stets zerteilt werden. Von großem Einfluß ist die Vertikalbewegung auf die Tropfengröße. Die Geschwindigkeit 8 m/sec verhindert alles Herabfallen von Tropfen, weil alle sich bildenden großen Tropfen wieder zerfallen und die entstandenen kleineren nach oben mitgerissen werden. Noch größere Aufstiegsgeschwindigkeiten können beliebige Wassermengen in beliebige Höhen heben. Bei den Geschwindigkeiten 6, 5 und 4 m/sec wäre die kleinste noch fallende Tropfenklasse 2,5, 1,5 und 1,0 mm. Erst bei 3 m/sec können alle Größen von 0,5 bis 5 mm fallen. Nach diesen Versuchsergebnissen teilt Lenard die Regen in zwei Klassen ein: 1. Stille Regen (Landregen) mit 0 bis 2 m/sec aufsteigender Luftbewegung und allen Tropfengrößen, doch überwiegen die kleineren Größen deswegen, weil diese Regen meistens aus den tiefen Wolken-schichten herrühren. 2. Tumultuarische Regen mit Vertikalgeschwindigkeiten größer als 8 m/sec. Es findet stetes Zerteilen und Wiederaanwachsen der Tropfen statt. Größere Tropfen können nur durch seitliches Herausgleiten in ruhige Luft zum Boden gelangen. Alle Regen mit Vertikalgeschwindigkeiten zwischen 2 und 8 m/sec stellen Übergänge zwischen diesen beiden Regenarten dar.

Es liegen zwei Messungen über die Fallgeschwindigkeiten des Regens vor; durch welche Lenards Laboratoriumsversuche voll bestätigt werden. Mache¹⁶⁹⁾ photographierte fallenden Regen und berechnete aus dem Strichbild mittelst der Brennweite und der Belichtungsdauer, daß bei einem Gewitter die maximale Aufstiegs- geschwindigkeit 8,8 m/sec bis herunter zu 1,8 m/sec betrug. Für die Tropfengröße fand er nach der Wiesnersehen Methode 40% aller Tropfen kleiner als 0,5 mm, 9 % größer als 3 mm. Schmidt¹⁷⁰⁾ erhielt, indem er die Regentropfen durch zwei sich drehende Scheiben mit sektorförmigem Ausschnitt fallen ließ, als Fallgeschwindigkeit für die großen Tropfen 7 bis 8 m/sec. Für die kleineren Tropfen ist die Fall- geschwindigkeit bedeutend kleiner, als man bisher angenommen hatte und geht dann kontinuierlich in die nur von der Luftreibung abhängige Geschwindigkeit kleinster Nebeltröpfchen über. Bei der Größe der Regentropfen hat Defant¹⁷¹⁾ eine Gesetzmäßigkeit gefunden. Schon Lenard hatte erwähnt, daß Lücken in der Größen Verteilung der Tropfen auftreten. Defant zeigt nun, daß sich die Gewichte der am häufigsten vorkommenden Tropfengrößen in jedem Regen wie 1:2:4:8 verhalten. Das Zusammenfließen der Tropfen wird also, wie diese Zahlen beweisen, um so leichter eintreten, je ähnlicher die Tropfen sind, und um so mehr erschwert, je verschieden groß sie sind. Schmidt¹⁷²⁾ erklärt dies Verhalten hydrodynamisch durch Abstoßen und Anziehen der fallenden als Kugeln angenommenen Tropfen an- einander, wodurch sich vorwiegend immer Tropfen gleicher Größe mit- einander vereinigen.

Lenards Arbeit von 1904 enthielt nur den hydrodynamischen Teil seiner neuen Untersuchungen, den elektrischen Teil veröffentlichte er noch nicht; auch unterließ er es, eine Elektrizitätstheorie des auf- steigenden Luftstroms aufzustellen, weil noch allerlei Widersprüche dabei auftraten. So fanden sich zwar beim Zerblasen des Wassers sehr

¹⁶⁹⁾ H. Mache, Über die Geschwindigkeit und Größe der Regentropfen. Meteorol. Zeitschr. 21, 378 (1904).

¹⁷⁰⁾ W. Schmidt, Eine unmittelbare Bestimmung der Fallgeschwindigkeit von Regentropfen. Wiener Sitzungsberichte IIa, 118, 71 (1909).

¹⁷¹⁾ A. Defant, Über Gesetzmäßigkeiten in der Verteilung der verschiedenen Tropfengrößen bei Regenfällen. Meteorol. Zeitschr. 22, 321 (1905).

¹⁷²⁾ W. Schmidt, Zur Erklärung der gesetzmäßigen Verteilung der Regen- tropfen bei Regenfällen. Meteorol. Zeitschr. 25, 496 (1908).

bedeutende Ladungen, beim Zerstieben aber nicht. Inzwischen hat dann Simpson⁶³⁾, nachdem schon Wilson¹⁷³⁾ einige Jahre vorher auf die Bedeutung der Wasserfallelektrizität für die Atmosphäre hingewiesen hatte, im Anschluß an seine Messungen der Niederschlags-
elektrizität in Indien die Lenardwirkung zur Grundlage einer Gewittertheorie gemacht, nach ihm seitdem häufig als Simpsonsche Gewittertheorie, von Lenard als Wasserfalltheorie der Gewitter bezeichnet. Simpson wiederholte die Lenardschen Messungen von 1904. Indem er die Ladung von 100 durch den Luftstrom zersprengten Tropfen mit einem Elektrometer maß, fand er im Mittel eine Tropfenladung von $+ 5,2 \times 10^{-3}$ elektrostatischen Einheiten, d. i. eine Volumenladung von 23 elektrostatischen Einheiten pro Kubikzentimeter. Mit einem Ebertsehen Aspirationsapparat ließ sich auch die entgegengesetzte negative Ladung in der Luft nachweisen. Diese Versuchsergebnisse wandte Simpson nun auf die atmosphärischen Vorgänge an. Er zweifelt nicht, daß die Gewitter zu den tumultuarischen Regen gehören, daß also die Grenzgeschwindigkeit 8 m/sec im aufsteigenden Luftstrom erreicht und überschritten wird. Hagel von Erbsengröße erfordert ja schon 10 m/sec, um schweben zu können. Im aufsteigenden Strom unterscheidet Simpson drei Gebiete. Unten besteht ein breites Strömungsgebiet, dann in der Mitte ein engerer Aufstiegskanal mit über 8 m/sec Geschwindigkeit und darüber wieder ein breiteres Ausströmungsgebiet. Nimmt man an, daß an der Basis die Temperatur 15° und die Temperatur abnahme mit der Höhe $0,5^\circ$ für 100 m beträgt, sowie daß der Kanal 2000 m hoch ist, so würden aus jedem Kubikmeter Luft infolge der adiabatischen Abkühlung rund 6 g Wasser ausgefällt werden. Geht, was nicht ganz zutreffen wird, all dieses Wasser durch den oberen Querschnitt des Kanals, so würden bei 8 m/sec Auftrieb 48 g Wasser in der Sekunde angesammelt. Das ergäbe in 10 Minuten 33 Tropfen der nach Lenard möglichen Maximalgröße von 5,5 mm über jedem Quadratzentimeter des Querschnitts, also eine beträchtliche Wassermenge, welche an die höchsten Werte des Platzregens in Mitteleuropa heranreicht. Um ein Feld von 30000 Volt/cm zu erzeugen — das wäre ungefähr die für einen Blitz notwendige Feldstärke —, müßten 1600 Tropfen pro Quadratzenti-

⁶³⁾ Siehe Seite 63.

¹⁷³⁾ C. T. R. Wilson, Nature 68, 102 (1903).

meter, jedes zu 5×10^{-5} elektrostatischen Einheiten gerechnet, gebrochen werden. Falls also nur in jeder Sekunde 1 Tropfen durch die Lenardwirkung gerochen und elektrisiert wird, kann die Entladung 27 Minuten später erfolgen, oder falls 27 Tropfen pro Sekunde zerbrechen, 1 Minute später. Die oben errechneten 33 großen Tropfen müßten jeder 45mal zerfallen, um die Feldstärke 30000 Volt/cm zu erhalten. Nimmt man die Zeit, die ein solcher Tropfen zum Zerfall und Wiederbilden braucht, zu 10 Sekunden an, so könnte also alle 7 bis 8 Minuten an derselben Stelle ein Blitz erfolgen. In seiner Arbeit von 1915 zeigt Lenard¹⁸⁰⁾, daß diese Simpsonsche Schätzung noch zu ungünstig ausfällt, weil die Elektrisierung beim Zerblasen der Tropfen viel größer ist, als Simpson auf Grund seiner noch unvollkommenen Versuche annimmt. Nach Lenard kann die Blitzfolge noch ungefähr 25mal schneller vor sich gehen. Diese Schätzungen setzen allerdings voraus, daß die der positiven Tropfenladung entgegengesetzte negative Ladung rasch von der Zerfallstelle hinweggeführt wird. Simpson nimmt an, daß die Luft mit den negativen Ladungen in den Kopf der aufsteigenden Strömung steigt und dort größtenteils von anderen Wolkenteilchen adsorbiert wird.

Den Mechanismus eines Gewitters stellt sich Simpson folgendermaßen vor: Die Tropfen wachsen zunächst an. Über der großen Vertikalgeschwindigkeit 8 m/sec findet ein starkes Anhäufen des Wassers statt, so daß auch horizontale Bewegung eintritt. Hier wird wegen des Schwankens der Luftströmung die Elektrisierung am größten sein. Daß in Simla (Indien), wo ja die positive Regenladung überhaupt ganz bedeutend überwiegt, alle Platzregen mit Regenmengen größer als 1 cm in 2 Minuten ausnahmslos positive Ladungen zur Erde bringen, deutet Simpson als eine Bestätigung seiner Anschauung. Negativ elektrischer Regen fällt in Simla meistens in Windpausen zwischen positivem Regen, niemals aber bei heftigen Schauern. Auch der Hagel kann, wenn er schnell fällt oder steigt, die Regentropfen zersprengen und elektrisieren. Simpson hält es aber wohl für möglich, daß bei gewöhnlichem Regen ganz andere Ursachen die Elektrizitätstrennung bedingen.

Gegen die von Simpson vertretene Wasserfalltheorie der Gewitter sind eine Reihe von Einwendungen erhoben worden. Alt¹⁷⁴⁾

¹⁸⁰⁾ Siehe Seite 131.

¹⁷⁴⁾ E. Alt, Zur Simpsonschen Gewittertheorie. Meteorol. Zeitschr. 27, 274 (1910).

führt aus, daß nicht allein die Vorgänge im aufsteigenden Luftstrom für die Gewitterbildung in Betracht kommen und daß durch die Theorie die zeitliche und räumliche Verteilung der Gewitter, z. B. in Süddeutschland, nicht erklärt werden. Dagegen macht Simpson¹⁷⁵⁾ mit Recht geltend, daß man dies auch nicht erwarten darf. Aganin¹⁷⁶⁾ wendet ein, daß die negativen Ladungen gegen ein so hohes Feld, wie es beim Gewitter bestehen muß, nicht fortgetragen werden können, sondern durch die positiven größtenteils wieder neutralisiert werden müssen. Simpson glaubt, daß sie, wenn sie nur an Wasser gebunden sind, auch forttransportiert werden. Die Neutralisation wird durch Nebeltröpfchen erschwert, an die sie sich lagern. Schwerwiegender ist ein Einwand von Wegener*), der darauf hinweist, daß die Wintergewitter durch die Wasserfalltheorie nicht erklärt werden, was auch Simpson zugeben muß. In einer Arbeit, in der er die langjährigen Potsdamer von Schindelhauer zusammengefaßten Registrierungen für seine Theorie zu deuten versucht, gibt Simpson¹⁷⁷⁾ ferner zu, daß er außer über den Schnee auch über den Landregen nichts sagen könne. In Potsdam ist nun aber im Gegensatz zu Simla nur etwa der zehnte Teil der Niederschläge gewitterig. Die Schwierigkeit, daß in Potsdam die negativen Einheitsladungen sich als viel stärker erwiesen als die positiven, will Simpson auf etwas eigentümliche Weise lösen. Die fortgewehten negativen Ladungen, die sich durch Adsorption ebenfalls an Tröpfchen lagern, sollen durch teilweise Verdunstung der Tröpfchen konzentrierter werden. Demgegenüber betont Schindelhauer¹⁷⁸⁾ nachdrücklich, daß nach den Potsdamer Messungen, die einen auffallenden Parallelismus der Vorgänge bei Schnee und Regen aufweisen, auf die gleiche Ursache für die Entstehung beider Elektrizitäten zu schließen ist. Ferner sind die Unterschiede zwischen Gewitterelektrizität, Böen- und Landregenelektrizität nur graduell, so daß auch

*) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre. S. 260.

¹⁷⁵⁾ G.C.Simpson, Bemerkungen zur Gewittertheorie. Meteorol. Zeitschr. 30, 238 (1913).

¹⁷⁶⁾ M. Aganin, Über die Simpsonsche Gewittertheorie. Meteorol. Zeitschr. 29, 171 (1912).

¹⁷⁷⁾ G. C. Simpson, Über die Elektrizität der Niederschläge. Physikal. Zeitschr. 14, 1056 (1913).

¹⁷⁸⁾ F. Schindelhauer, Über die Elektrizität der Niederschläge. Physikal. Zeitschr. 14, 1292 (1913).

hier der elektrische Vorgang gleich sein muß. Das vermag aber die Wasserfalltheorie nicht zu erklären. Rätselhaft bleibt das Verhalten der negativen Ladungen bei der Simpsonschen Vorstellung. Die Adsorption ist bekanntlich recht gering. Wenn dazu noch Ladungskonzentration durch Verdampfen treten soll, dann ist nicht einzusehen, warum eine Wolke überhaupt noch abregnet, wenigstens eine negativ geladene Wolke. Außerdem treten ja die negativen Ladungen keineswegs gesondert auf, vielmehr wechseln sie mitten im Gewitter mit den positiven in bunter Reihenfolge ab. Graupeln wären nach der Wasserfalltheorie eher negativ als positiv zu erwarten, weil sie sich in größter Höhe bilden, wo die negativen Ladungen überwiegen sollen. Im Frühjahr und Sommer, wo der aufsteigende Luftstrom am größten ist und die Niederschläge am stärksten elektrisch sind, ist in Potsdam im Widerspruch zur Simpsonschen Vorstellung der positive Überschuß der Nieder Schlagsladungen am allergeringsten.

In einem 1915 erschienenen Aufsatz¹⁷⁹⁾ geht Simpson nochmals auf die Wasserfalltheorie ein. Scheinbar versagt sie bei Landregen, doch kann man auch hier einen deutlichen Tropfenzerfall beobachten, und zwar immer dann, wenn große und kleine Tropfen zusammenstoßen oder wenn die Windgeschwindigkeit sich ändert. Nach einem quantitativen Überschlag würde es genügen, wenn bei Landregen nur ein Zehntel aller Tropfen zerfällt, um die beobachteten Ladungen zu erklären. Geitel¹⁵⁶⁾ weist jedoch darauf hin, daß diese angebliche Elektrisierung des Landregens schwer zu verstehen ist. Die Elektrisierung des Schnees will Simpson jetzt ebenso erklären wie beim Aufwirbeln von Staub. Der Schnee soll dabei positiv, die Luft negativ werden. Die häufig vorkommenden negativen Schneeladungen, die in Mitteleuropa sogar überwiegen, führt Simpson wieder auf die Adsorption zurück. Die Messungen von Kahler⁵²⁾ haben gezeigt, daß bei der Elektrisierung von Staub außer den großen, festen, positiven Teilchen auch noch kleine, feste, negative Teilchen entstehen. Die Möglichkeit eines solchen Vorgangs in der Atmosphäre ist im vorigen Abschnitt (4) besprochen worden. Die negativen Ladungen der großen

¹⁷⁹⁾ G. C. Simpson, Die Elektrizität der atmosphärischen Niederschläge. Philosophical Magazine (6) 80,1 (1915). Referat von G. Berndt in den „Naturwissenschaften“ 3- 634 (1915).

¹⁵⁶⁾ Siehe Seite 117.

⁵²⁾ Siehe Seite 57.

Schneeflocken und das positive Potentialgefälle, wie es bei Schneefall am Boden meistens besteht, vermag diese Vorstellung aber nicht zu erklären. Vielmehr müßten, wenn dieser Vorgang allein wirksam wäre, gerade die umgekehrten Vorzeichen eintreten, also dieselbe Elektrizitätsverteilung, die wir beim Landregen beobachten.

Inzwischen hatte Lenard¹⁸⁰⁾ seine Forschungen über die Wasserfallwirkung fortgesetzt. Untersuchungen über die Oberflächenspannung der Flüssigkeiten führten ihn zu dem Schluß, daß die Vorstellung von 1892 über die Doppelschicht zwischen Gas und Flüssigkeit nicht aufrecht zu erhalten ist, sondern daß diese Doppelschicht ganz in die Flüssigkeit verlegt werden muß. Das wird durch die elektrischen Messungen bestätigt. Weder schnelles Fallen durch Luft, noch bloßes Zerteilen der Flüssigkeit und der Tropfen ist elektrisch wirksam, sondern einzig und allein Zerblasen der Flüssigkeit, beispielsweise durch einen Sprenger. Die negative Ladung, die bisher der Luft zugeschrieben wurde, haftet genau wie die positive an Wassertropfen, und zwar an sehr feinen Tröpfchen, dem Wasserstaub. Diese feinsten Tröpfchen werden offenbar aus der Flüssigkeit gerissen. Sie bildeten vorher den negativen Belag der Doppelschicht, der positive Belag bleibt in der Flüssigkeit zurück. Werden größere Teile herausgeführt, so geht auch der positive Belag mit, d. h. es tritt keine Elektrisierung ein. Wirksame Elektrisierung kann auf zweierlei Weise erfolgen, erstens von außen her durch einen Luftwirbel, zweitens durch das Auftreffen auf ein Hindernis. Wesentlich ist stets die Heftigkeit des Vorgangs. Die Doppelschicht in der Flüssigkeitsoberfläche wird hervorgerufen durch Molekularkräfte. Ihre Dicke ist gleich dem Radius der Wirkungssphäre. Diese Schicht wird beim amorphen Erstarren der Flüssigkeit be tehen bleiben, d. h. auch feste Körper haben diese Doppelschicht. Bei der Reibungselektrizität zwischen zwei festen Körpern spielt nicht das angrenzende Gas, sondern die äußerste Schicht der festen Körper die Hauptrolle. Da der Radius der Wirkungssphäre 8×10^{-7} cm beträgt, so ist der Durchmesser der herausgesprengten negativen Tröpfchen kleiner als diese Zahl.

Die Versuche Simpsons in Simla hat Lenard in Heidelberg wiederholt. Dabei war es nicht leicht, zu einem einheitlichen Ergebnis

¹⁸⁰⁾ P. Lenard, Über Wasserfallelektrizität und über die Oberflächenbeschaffenheit der Flüssigkeiten. Annalen der Physik (4) 47, 463 (1915).

zu gelangen, wenn man wie Simpson nur die Verteilung der Wassermassen durch die Luft im Auge hat. Dazu kommt, daß eine einwandfreie Nachbildung der bei einem Gewitter obwaltenden Verhältnisse kaum möglich ist. Der eigentliche Wasserfalleffekt wird geschwächt durch Influenzladungen gröberen Wasserstaubs, der in die Luft entweicht. Doch sinkt dieser Staub, weil er schwerer ist, leichter zu Boden, so daß in einiger Entfernung die Elektrisierung besser wird. Sicher ist, daß bei den kleineren Tropfengrößen, etwa kleiner als 4 mm, wo nur eine Vereinigung durch Zusammenstoß zu erwarten ist, die Elektrisierung gering bleibt, also für die Gewitterbildung keineswegs ausreicht. Bei den Tropfen größer als 5 mm kommt bei hohen Vertikalgeschwindigkeiten ein Zerteilen der Tropfen vor, und zwar dauernd, ohne daß die Tropfen zur Erde gelangen. Im wirbellosen Luftstrom bleibt das Zerteilen ebenfalls elektrisch ziemlich unwirksam. In stark wirbelnder oder stoßweise bewegter Luft dagegen, wo die Luftströme stoßweise tangential angreifen (im Laboratorium, wenn keine Vorsorge gegen Wirbel getroffen ist oder wenn der Ventilator unregelmäßig geht), dann können große Tropfen explosionsartig zu Staub zersprengt werden. Dabei ist die Elektrisierung recht groß, etwa 10^{-9} Coulomb pro Kubikzentimeter Wasser. Und das genügt vollkommen zur Erklärung der Gewitterelektrizität. Nach der Schätzung von W. Kohlrausch⁹⁷⁾ beträgt die Elektrizitätsmenge einer blitzenden Wolke bis zu 100 Coulomb, das wären bei 1 Quadratkilometer Wolke 10^{-8} Coulomb pro Quadratzentimeter. Ein Gewitterregen von 10 mm oder 1 Kubikzentimeter pro Quadratzentimeter der Wolke würde also nur 10 mal den Zerblasungsprozeß an den Tropfen erfordern, was wohl in wenigen Minuten möglich wäre. Werm Wolkenbrüche ohne jede Gewittererscheinung vorkommen, so liegt das offenbar daran, daß trotz großen Wasserreichtums kein tumultuarischer Luftstrom stärker als 8 m/sec vorhanden war.

Daß die Wasserfalltheorie quantitativ ausreicht, um die Gewitterelektrizität zu erklären, ist auch aus Rechnungen von Seeliger¹⁵⁷⁾ ersichtlich. Seeliger nimmt die Lenardwirkung direkt als ein Stadium des Regens an, und zwar als das letzte Stadium.

Nach Geitel¹⁵⁶⁾ gibt die nach den neueren Ergebnissen Lenards

⁹⁷⁾ Siehe Seite 91.

¹⁵⁷⁾ Siehe Seite 118.

¹⁵⁶⁾ Siehe Seite 117.

schärfer gefaßte Wasserfalltheorie im wesentlichere ein in sich widerspruchsfreies Bild eines möglichen elektrischen Vorganges in den Wolken. Quantitativ genügt die Theorie, auch aufsteigende Luftströme von 8 m/sec und darüber kommen in den Gewitterwolken sicherlich vor. Die Schwäche der Theorie liegt in der Anschauung, wonach nur bei tumultuarischer Aufwärtsbewegung die Elektrisierung wirksam ist. Es ist nur schwer vorzustellen, daß die Luftbewegung in so kleinen Raumelementen nach Stärke und Richtung wechselnd verläuft und so an verschiedenen Stellen des Tropfens ungleichmäßig angriffe. Die Hauptfrage wird so, nicht wie Simpson sie aufwarf, daß überhaupt Wassertropfen zerreißen, sondern wie dieses Zerreißen erfolgt.

Durch weitere Untersuchungen im Lenardsehen Institut¹⁸¹⁾ ist auch die Art des Zerreißen noch ganz geklärt worden. Hochschwender hat den Vorgang eingehend mit einer ähnlichen Versuchsanordnung wie Lenard 1904 quantitativ verfolgt. Bei genügender Veränderlichkeit der aufsteigenden Luftgeschwindigkeit zeigten sich dabei ganz eigentümliche, nur bei Augenblicksbeleuchtung erkennbare Vorgänge, die dem freien Auge als plötzliches Zerreißen des Tropfens erscheinen. Hochschwender hat sie durch eine Reihe von filmartigen Photographien festgehalten. Danach wird der Tropfen in ganz kurzer Zeit, etwa $\frac{1}{30}$ Sekunde, zunächst von unten hutartig ausgehöhlt und dann von innen heraus zerblasen, wobei sein oberster Teil sich auf Augenblicke in eine dünne Haut verwandelt. Diese Haut wird vom Luftstrom durchlöchert, wobei die plötzlich frei durch den ringförmigen Wasserrest blasende Luft aus diesem Wasserrest eine große Zahl kleinster Tröpfchen ablöst, während die verbleibenden größeren Teile mehr seitlich auseinander getrieben werden. Hochschwender zeigte, daß die mit dem Luftström entweichenden kleinsten Tröpfchen negativ geladen sind, die größeren seitlich entweichenden dagegen positiv. So fand er z. B. bei einem großen Tropfen von 4,8 mm Durchmesser = $0,8 \times 10^{-12}$ Coulomb, d. h. eine Einheitsladung von $1,4 \times 10^{-n}$ Coulomb. Diese Zahl stellt aber nur einen Teil der wirklich abgetrennten Ladung dar, weil es sich bei den Versuchen nicht vermeiden ließ, daß viele große Tropfen mit dem feinen negativen Wasser-

¹⁸¹⁾ E. Hochschwender, Über das Zerblasen von Wassertropfen im Luftstrom und die Wasserfalltheorie der Gewitter. Dissertation. Heidelberg 1919. — P. Lenard, Zur Wasserfalltheorie der Gewitter. Annalen der Physik (4) 65,629 (1921),

staub entwichen. Die von Lenard und Seeliger ihren Schätzungen zugrunde gelegten KT^{10} Coulomb sind also gerechtfertigt.

Das „Zerblasen“ und damit die starke Elektrisierung tritt aber nur bei stoßweise schwankender Luftgeschwindigkeit ein. Es sind offenbar die kurzen, großen Überdrucke der Luft an der unteren Wasserfläche, welche die Aushöhlung und damit alles andere bewirken. Im Gegensatz dazu kommt bloßes Zerteilen, „Zerfahren“ der Tropfen auch unter dem Einfluß tangentialer Reibungskräfte bei ruhigem Schweben im wirbelfreien Luftstrom vor. Dann bildet sich im Tropfen ein Ring, der sich öffnet und nachher in elektrisch neutrale Tropfen zerfällt. Man kann nach Lenard solche Ringe z. B. beim Hineintropfen einer gefärbten Flüssigkeit in Wasser sehen. Die Schwankungen der Luftgeschwindigkeit, die zum allein elektrisch wirksamen Zerblasen nötig sind, betragen nach Hochschwender bei Tropfengrößen von 5,5 mm, den größtmöglichen Tropfen, 3 m/sec, bei 4 mm schon 6,4 m/sec, bei 2,5 mm sogar 14 m/sec. Bei den größten Tropfen ist also außer der zum Schweben nötigen Grundgeschwindigkeit von 8 m/sec ein Anschwellen bis 11 m/sec nötig, bei der Tropfengröße 2,5 mm außer der Grundgeschwindigkeit 6 m/sec eine Schwankung bis 20 m/sec. Vermutlich tritt also ein Zerblasen nur bei den größten Tropfen ein; denn auch schon bei der Größe 4 mm, von denen Lenard 1904 schon zeigte, daß sie im allgemeinen unversehrt ihren Weg durch die Luft finden, müßte die Schwankung der aufsteigenden Luft größer sein als die Aufstiegggeschwindigkeit. Daß die Bedingungen für die großen Tropfen, 8 m/sec mit Schwankung bis 11 m/sec, in den Tropen leicht, in Mitteleuropa zur Sommerzeit erfüllt sein werden, daran zweifelt Lenard nicht. Das von Mache¹⁸²⁾ bei tiefer Sonne beobachtete Aufblitzen einzelner Tropfen bald hier, bald da in einer Regenwand während eines heftigen Gewitters hält Lenard für das Augenscheinwerden des elektrisch wirksamen Zerblasens der Tropfen; denn die plötzliche Zerteilung eines großen, wenig Licht reflektierenden Tropfens in viele kleine, viel Licht reflektierende Tröpfchen muß dem Auge bei günstiger Beleuchtung als Aufblitzen erscheinen. Auch der Anblick im Laboratorium bei den Versuchen mit dem Ventilator entspricht dem vollkommen. Mache erklärt übrigens das Aufblitzen dadurch, daß große schnelle Tropfen auf kleinere, langsamere auftreffen und zerspritzen.

¹⁸²⁾ H. Mache, Zur Erklärung des Überwiegens positiv elektrischer Regenschladungen. Meteorol. Zeitschr. 36, 350 (1919).

Auf den kleintropfigen Landregen sind die Überlegungen nicht anwendbar. Hier ist kein Zerblasen möglich, also wohl eine andere Ursache für die Elektrisierung anzunehmen, ebenso bei den Schneegewittern.

Neuerdings sind von Nolan und Enright¹⁸³⁾ noch einige Laboratoriumsversuche beschrieben worden, die sie als einen vollständigen Beweis für die Simpsonsehe Auffassung der Gewitterbildung deuten. Soviel ich sehe, wird aber die Exaktheit der Lenardschen Messungen nicht erreicht.

Nachdem durch die mustergültigen Untersuchungen Lenards die Bedingungen für das Eintreten der Wasserfallwirkung so genau festgelegt sind, müßte es eigentlich ein Leichtes sein, zu sagen, ob und wann die Wirkung in der Atmosphäre eintritt. Leider ist aber unsere Kenntnis von der ausschlaggebenden Größe, der Vertikalbewegung, noch recht gering. Gerade bei Gewittern fehlen exakte Messungen so gut wie ganz, und man ist nur auf die meist sehr subjektiven Berichte von Luftfahrern angewiesen, die wider Willen hineingerieten und oft von heftigen Vertikalböen herauf- und heruntergedrückt wurden. Zurzeit als Gerdien seine Schätzungen über den Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre anstellte, lag nur ganz unzulängliches Beobachtungsmaterial über die Vertikalbewegung bei jedem Wetter vor. Bei einer Ballonmessung war etwa 6 m/sec in einer Cumuluswolke beobachtet worden. De Quervain¹⁸⁴⁾ erwähnt im Jahre 1908, daß er bei verschiedenen Gelegenheiten Aufstieggeschwindigkeiten von 3 bis 4 m/sec in rasch aufsteigenden Cumulusköpfen gemessen hat. Es kommen selten noch größere Werte vor, „ganz abgesehen von noch heftigeren Bewegungen im Inneren von Gewitterwolken“. Stuchtey¹⁸⁵⁾ berechnet aus zwei aufeinanderfolgenden Photographien der Cirruskappe eines Cumulusgipfels eine Aufwärtsbewegung von 7,5 m/sec. In Batavia soll nach Hann*) beobachtet worden sein, daß aus Cu-wolken in

*) J. Hann, Lehrbuch der Meteorologie. 3. Aufl. 1915. S. 664.

¹⁸³⁾ J. J. Nolan und J. Enright, Versuche über die Elektrisierung, die durch das Zerspritzen (breaking) von Wasser hervorgerufen wird, mit besonderer Rücksicht auf die Simpsonsche Gewittertheorie. Proceedings of the Royal Dublin Society 17, 1 (1922).

¹⁸⁴⁾ A. de Quervain, Beiträge zur Wolkenkunde. Meteorol. Zeitschr. 25, 433 (1908).

¹⁸⁵⁾ K. Stuchtey, Kappen über Cumulusköpfen im 4000 m-Niveau. Meteorol. Zeitschr. 31, 19 (1914).

10 km Höhe neue Köpfe, die sich gleich mit Cirrostratus umgaben, mit etwa 10 m/sec Geschwindigkeit herauswuchsen. Defant¹⁸⁶⁾ berechnet, daß bei einbrechender kalter Luft von 10 m/sec Horizontalgeschwindigkeit schon in 500 m Höhe über dem Boden etwa 5 m/sec Vertikalgeschwindigkeit herrschen muß, also Beträge, die wir sonst nur bei Horizontalbewegung wahrnehmen. Die Erfahrungen bei Doppelvisierungen von Pilotballonen sind geteilt. Während Tetens schließen zu können glaubt, daß die Schwankungen in der Vertikalbewegung of von derselben Größenordnung sind als bei der Horizontalbewegung, erhielt Braak im allgemeinen keine höheren Werte als 2 m/sec. Ludewig¹⁸⁷⁾ maß während einer Ballonfahrt bei ungewöhnlicher Wetterlage nur Werte von 3 m/sec.

In neuester Zeit liegen zwei längere Beobachtungsreihen über die AufStieggeschwindigkeiten in Wolken vor. Die, erste dieser Reihen von Hartmann¹⁸⁸⁾ mit einem Entfernungsmesser auf dem Feldberg im Schwarzwald in 1300 bis 1500 m Höhe erhalten, scheint auf den ersten Blick eine glänzende Bestätigung der Wasserfalltheorie zu sein. Zwar ergibt sich bei den Mittelwerten nichts Bemerkenswertes. 80 Messungen beim Cumulus (mittlere Seehöhe 2540 m) hatten + 1 m/sec mittlere Auf Stieggeschwindigkeit, 226 beim Alto-Cumulus (3540 m) + 1,3 m/sec, 102 beim Cirrus (5200 m) + 3,3 m/sec. Aber in den Einzelwerten finden sich beim Cumulus Höchstwerte von +16 und — 6 m/sec, beim Alto-Cumulus + 42 und — 36, beim Cirrus + 59 ? (das Fragezeichen ist von Hartmann selber) und — 25 m/sec. Trotzdem es sich bei seinen Messungen nach seiner eigenen Angabe nur um eine erste Orientierung handelt, deutet Hartmann diese enorm hohen Werte als einen Beweis für den tumultuarischen Vorgang bei der Wolkenbildung. Die Hartmannschen Zahlen sind aber auf keinen Fall wirkliche Vertikalbewegungen, sondern die Beobachtungen sind offenbar durch plötzliches Sichtbarwerden (Kondensation) der Wolken in der Vertikalen zu erklären, wodurch nur eine Vertikalbewegung

¹⁸⁶⁾ A. Defant, Über die Dynamik der Böen. Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre 9, 108 (1921).

¹⁸⁷⁾ P. Ludewig, Die Bedeutung der vertikalen Luftbewegungen für die Luftfahrt. Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie 43, 99 (1915).

¹⁸⁸⁾ W. Hartmann, Schichtgrenzen und Wolkenbildung in der freien Atmosphäre. Veröffentlichungen der badischen Landeswetterwarte. Nr. 3. Karlsruhe 1922.

vorgetäuscht wird. Die zweite Messungsreihe sind die von Süring¹⁸⁹⁾ bearbeiteten 20jährigen Ergebnisse aus den exakten Photographien des Potsdamer Wolkenautomaten, der von einer festen Basis aus eine im Zenith befindliche Wolke doppelt photographiert. Aus einer doppelten Aufnahme (mit 4 Platten) läßt sich außer der Wolkenhöhe auch Horizontal- und Vertikalbewegung ausmessen. Trotzdem die größte Horizontalbewegung, die auf diese Weise erhalten wurde, 66 m/sec betrug, bleibt die Vertikalbewegung in den allermeisten Fällen unter ± 1 m/sec. Der in den 20 Jahren eingetretene höchste Wert war + 5,4 m/sec in 10 km Höhe im April bei westlicher, 32 m/sec Horizontalbewegung, der zweithöchste Wert + 2,5 m/sec ebenfalls im Frühjahr in 8,4 km Höhe und nur 4 m/sec Horizontalbewegung. Der höchste Herbstwert war $-1,8$ m/sec, der höchste Sommerwert lag ebenfalls unter 2 m/sec, der höchste Winterwert sogar unter 1 m/sec. Nun sind ja diese Aufnahmen meistens bei gutem Wetter erhalten worden. Wenn aber wirklich die Geschwindigkeit 8 m/sec häufig auftritt, dann hätte man wohl eigentlich erwarten sollen, daß auch diese Schönwetterwerte wesentlich größer ausfallen müßten. Es sind auch Aufnahmen mit starker Wetteränderung darunter, auch solche einige Zeit vor einem Gewitter, wo die Cumulo-nimbus-Bildung schon beginnt.

Das Ergebnis ist also keineswegs ermutigend für die Wasserfalltheorie der Gewitter. Außer bei Landregen ist sie auch bei Böen und Gewittern nicht der alleinwirkende Vorgang, wenn auch nicht zu bezweifeln ist, daß sie mitten im heftigen Böenwirbel eintreten muß. Die von Schindelhauer¹⁷⁸⁾ im Jahre 1913 gegen die Simpsonsche Auffassung erhobenen Einwände gelten in der Hauptsache noch heute. In den wichtigsten Punkten, der Erklärung der Ladungen vom Schnee und Landregen, haben sich die Schwierigkeiten sogar vermehrt. Dazu kommt, daß Gschwend⁶⁷⁾ bei seinen genauen Messungen der Ladungen einzelner Tropfen eine Folgerung der Wasserfalltheorie nicht bestätigt findet, nämlich die, daß bei einem Gewitter die großen Tropfen positiv, die kleinen negativ elektrisch sind. In Freiburg (Schweiz) waren umgekehrt durchschnittlich die negativen Tropfen die größeren.

¹⁸⁹⁾ R. Süring, Photogrammetrische Wolkenforschung in Potsdam in den Jahren 1900—1921. Abhandlungen des Preuß. Meteorologischen Instituts 7, Nr. 3 (1922).

¹⁷⁸⁾ Siehe Seite 129.

⁶⁷⁾ Siehe Seite 66.

Auffällig ist, daß gerade bei Landregen, wo an eine Wasserfallwirkung gar nicht zu denken ist, die Vorzeichen der beiden Tropfenarten genau so sich finden, als ob die Wirkung doch stattgefunden hätte: Wie die Raumladungsmessungen von Kähler⁶²⁾ beweisen, sind bei Landregen in Potsdam die großen Tropfen, deren Ladung bei der Niederschlagselektrizität gemessen wird, positiv, während gleichzeitig in der Luft feine negative Tröpfchen vorhanden sind. Die Wasserfallwirkung am festen Erdboden kann diese Elektrizitätstrennung nicht bewirken. Es war nur natürlich, daß man seit Lenards Arbeit von 1892 die negativen Werte des Potentialgefälles bei Landregen der Aufprallwirkung der Tropfen zuschrieb. Die oben erwähnten Raumladungsmessungen beweisen jedoch, daß die Elektrizitätstrennung, schon in der Luft vor sich gehen muß. Ein Beweis dafür waren schon die Weißschen⁶¹⁾ Messungen der Niederschlagselektrizität, bei denen die Aufprallwirkung vollkommen ausgeschaltet war und die dennoch oft positive Ladungen der Regentropfen ergaben. Das negative Potentialgefälle bei Landregen rührt daher, daß ein Überschuß des feinen negativen Wasserstoffs in der Luft zurückbleibt, nachdem die großen positiven Tropfen zu Boden gefallen sind.

6. Influenzvorgänge an den Niederschlägen

Da in der Atmosphäre stets ein ziemlich starkes, wenn auch mit der Höhe abnehmendes elektrisches Feld vorhanden ist, also die Wolken- und Regenbildung in diesem Felde erfolgt, so ist es nicht nur möglich, sondern selbstverständlich, daß es von Einfluß auf die Niederschläge sein muß. Dieser Gedanke — wie man sich damals ganz treffend ausdrückte: die Möglichkeit, die Elektrizität der Regenwolke aus der Schönwetterelektrizität zu erklären — ist zuerst von Elster und Geitel¹⁹⁰⁾ im Jahre 1885 ausgesprochen und dann vor allem in ihrer Arbeit von 1890 über die Elektrizität der Niederschläge näher begründet worden⁵⁸⁾. Die Wolke ist an sich nach außen nicht elektrisch, weil sie eine Art Dielektrikum bildet. Sobald der Regen beginnt, aber auch schon

⁵²⁾ Siehe Seite 57.

⁶¹⁾ Siehe Seite 62.

¹⁹⁰⁾ J. Elster und H. Geitel, Über die Elektrizitätsentwicklung bei der Regenbildung. Wiedemanns Annalen 25, 121 (1885).

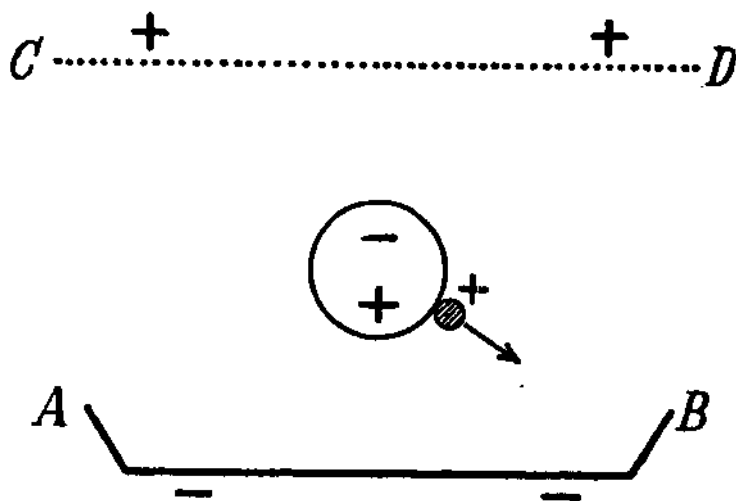
⁵⁸⁾ Siehe Seite 61.

dann, wenn die einmal entstandenen Tropfen sich in der Wolke bewegen, wird eine Berührung dieser größeren mit den kleineren Tröpfchen, vor allem mit den Wolkenelementen eintreten. Dabei findet nicht immer ein Zusammenfließen statt, sondern häufig ein Gleiten der Tropfen aneinander. In dem Augenblick, wo die beiden Tropfen sich wieder trennen, muß infolge der Influenzwirkung des Feldes auch eine Elektrizitätstrennung eintreten. Unter Vernachlässigung der Kompression der Luft am fallenden Tropfen und der dadurch bewirkten Formänderung wandten Elster und Geitel auf ihn die Kirchhoffschen Gesetze über die Bewegung einer Kugel in einer Flüssigkeit an. Die Stromlinien der ausweichenden Luftteilchen sind dann ebene Kurven, die symmetrisch in bezug auf die durch den Mittelpunkt der Kugel (des Tropfens) gelegte Horizontalebene verlaufen. Danach würde ein Herumgleiten der kleinen Nebeltröpfchen an den großen Tropfen eintreten müssen, wobei das Nebelteilchen auf die obere Hälfte des großen Tropfens übergeführt würde und erst dort den Tropfen verlassen könnte. Da an einem frei schwebenden Tropfen unter dem influenzierenden Einfluß des normalen Feldes (Erde negativ, Atmosphäre positiv) die Elektrizitätsscheidung so erfolgt, daß der Tropfen unten positiv, oben negativ wird, so müßte also das herumgleitende kleine Tröpfchen negativ, der nach unten sinkende große Tropfen positiv elektrisch werden. Die Größe der Ladung hängt ab von der Niveaufläche des Feldes, in der der Tropfen sich befindet. Die einfachste Möglichkeit der Tropfenelektrisierung wäre die des Zerteilens eines Tropfens. Auch dabei muß es zu einer Scheidung der Elektrizitäten kommen, außer wenn Stücke aus der elektrisch neutralen Mitte des Tropfens herausgerissen werden. Das Herumgleiten der kleinen Tröpfchen ist deswegen erschwert, weil die Regentropfen in Wirklichkeit keine Kugeln sind, sondern parallel zur Horizontalen abgeplattet. Diese Erkenntnis, sowie die Einsicht, daß die 1885 und 1890 vortragene Auffassung den inzwischen vor allem durch Lenards Arbeiten erfolgten Fortschritten in mancher Beziehung nicht mehr entsprach, veranlaßte Elster und Geitel¹⁹¹⁾ im Jahre 1912 die Influenztheorie abzuändern. Sie nahmen nicht mehr ein Herumgleiten des Nebelteilchens um den großen Tropfen und Trennung an dem oberen

¹⁹¹⁾ J. Elster und H. Geitel, Zur Influenztheorie der Niederschlagslektrizität. Physikal. Zeitschr. 14, 1287 (1913).

Tropfenende an, sondern ein Abprallen an der unteren Tropfenfläche. Dadurch tritt natürlich eine Umkehrung der Vorzeichen ein: das Nebelteilchen wird im normalen Erdfeld positiv, der große Tropfen negativ.

Ebenso wie die Regentropfen müssen sich die festen Graupel- und Hagelkörner verhalten. Bei ihnen werden die Bedingungen des Abprallens noch günstiger sein, falls man ihnen nur eine genügende elektrische Leitfähigkeit zuschreibt. Doch ist bekanntlich das Eis bei sehr tiefen Temperaturen ein Nichtleiter. Dagegen ist die Betrachtungsweise auf die Schneeflocken nicht ohne weiteres anwendbar. Hier



Figur 9

Tropfen-Influenzierung in einem künstlichen Feld (nach Elster und Geitel)

sind also eher Zeichenunterschiede zu erwarten. Von wesentlichem Einfluß bei Schnee, wie bei den Niederschlägen überhaupt müssen die Luftströmungen in der Wolke und unter der Wolke sein, weil durch sie starke Verschiebungen und Änderungen der Ladungen eintreten müssen. Auch ein Herabsinken ganzer Wolkenmassen, wie man es seit Koppen bei Böen und Gewittern annimmt, ist von großem Einfluß. Wenn nun gar erst Blitzentladungen stattfinden, dann muß sich bei jedem Zeichenwechsel des Feldes der ganze Mechanismus des Influenzvorganges umkehren, wodurch ein regelloser Zeichenwechsel der Niederschlagsladungen herbeigeführt wird. Die ältere Auffassung der Influenztheorie muß, wenn sie allein wirksam ist, zu einer Schwächung oder Umkehr des Feldes führen, weil die positiven großen

Tropfen zur Erde gelangen und die kleinen negativen in der Luft zurücklassen. Die neuere Auffassung gibt dagegen eine Feldverstärkung; das ist ein großer Vorzug dieser Betrachtungsweise. Das machen Elster und Geitel an folgendem Beispiel klar (Figur 9). AB sei eine negativ geladene Schale, C D ein positiv geladenes Netz. Ein Tropfen zwischen Schale und Netz wird sich so polarisieren, daß er unten positiv und oben negativ wird. Ein unten abprallendes kleineres Tröpfchen nimmt positive Ladung an. Der negative große Tropfen gelangt infolge der Schwerkraft in die Schale, wo er ihre Ladung vermehrt, ebenso wie das in der Luft bleibende positive Tröpfchen die Netzladung verstärkt. Die Schwerkraft leistet Arbeit gegen die Feldstärke. Hierin liegt die Energiequelle für die Elektrisierung der Tropfen.

An derselben Stelle geben Elster und Geitel eine quantitative Schätzung der Wirkung. Die Feldstärke F erzeugt auf dem großen Tropfen, der wieder als Kugel angenommen wird, oben und unten die elektrische Dichte

$$\sigma = \frac{3F}{4\pi}.$$

Das Nebelteilchen vom Radius Q nimmt $\frac{\pi^2}{6}$ vom tiefsten Punkte eine Ladung E an, deren mittlere Dichte das $\frac{\pi^2}{6}$ fache von σ wäre.

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

Bei Wasser beträgt das Gewicht eines Nebelteilchens $\frac{4}{3}\pi Q^3$ Gramm,

d. h. auf 1 g Wasser entfallen $\frac{3}{4\pi Q^3}$. Falls alle Nebelteilchen eine wirk-

same Begegnung mit großen Tropfen gehabt haben, was natürlich nicht ganz zutrifft, so ist die auf ihr vorhandene Elektrizitätsmenge

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

elektrostatische Einheiten. Nimmt man $\hat{Q} = 0,001$ cm und F zu 100 Volt/m $= 5^{1/300}$ elektrostatischen Einheiten, so ist die Gesamtladung eines Gramm Wassers beim Nebelteilchen $\frac{5}{4}\pi$ oder ungefähr 4 elektrostatische Einheiten, eine Zahl, wie sie wirklich bei Regen

gemessen wird. Da eine Wolke etwa 5 g Wasser pro Kubikmeter enthält, so gibt das etwa 20 elektrostatische Einheiten Ladung pro Kubikmeter.

Bei normalem Feld sind nach dieser Anschauung die großen Tropfen negativ, die kleinen positiv zu erwarten. Das Potentialgefälle am Erdboden müßte also nach Elster und Geitel, weil die negativen Ladungen zunächst nach unten gelangen, negativ werden. Die auf S. 138 entwickelten Ansichten stehen aber dieser Elster und Geitel'schen Auffassung entgegen. Doch trifft es zu, daß nach der Influenztheorie entgegengesetztes Vorzeichen zwischen Potentialgefälle und Regenelektrizität, sogenanntes spiegelbildliches Verhalten beider Elemente, zu erwarten ist, und das wird in der Tat durch die Beobachtungen bestätigt. Nach Elster und Geitel ist es nicht gesagt, daß das erregende Feld immer das normale sein muß. Sie halten es wohl für möglich, daß innerhalb der Wolke durch Verlagerung von Wolken-schichten und vor allem durch die Blitzentladungen das Feld sich auch umkehrt.

Schindelhauer¹⁷⁸⁾ glaubt, daß nur die Influenztheorie imstande ist, die Ergebnisse der langjährigen Potsdamer Niederschlagselektrizitäts-registrierungen zu erklären. Es fällt ihm jedoch ein Widerspruch mit den Beobachtungen auf. Die kleinen Tropfen erweisen sich nicht als positiv, wie es die neuere Form der Theorie verlangt, sondern als negativ elektrisch, Schindelhauer vermutet, daß die großen negativen Tropfen in der Luft verdampfen können, während die länger in der Luft verbleibenden kleinen positiven anwachsen. Es ist aber wohl unmöglich, daß durch solche gar nicht bewiesenen Vorgänge eine elektrische Wirkung vollkommen in ihr Gegenteil verkehrt werden kann. Die Schwierigkeit mit den Vorzeichen bleibt also bestehen. Simpson¹⁷⁷⁾¹⁷⁹⁾ betont eine weitere. Ein elektrischer Kontakt zweier Tropfen ohne Zusammenfließen ist kaum denkbar. Vor allem geladene Tropfen müssen stets zusammenfließen. Ungeladene können sich überhaupt nicht berühren, sondern bleiben stets durch eine Luftschicht getrennt. Auch beim Zersprengen der Tropfen, will Simpson die Influenzwirkung nicht gelten lassen. Der Stütze durch das Experiment ermangelt die Influenztheorie noch ganz. Zwar führten schon im Jahre

¹⁷³ⁱ⁾ Siehe Seite 129.

¹⁷⁷⁾ Siehe Seite 129.

¹⁷⁹⁾ Siehe Seite 130.

1885 Elster und Geitel einen Versuch aus, der aber wenig beweiskräftig ist, weil andere Vorgänge mit hineinspielen.

Die Influenztheorie hat aber soviel Vorzüge — keine andere Vorstellung kann den häufigen Zeichenwechsel und die hohen Ladungen, die dabei auftreten, so leicht erklären —, daß an ihr festgehalten werden muß. Um die beiden oben erwähnten Hauptschwierigkeiten zu beseitigen, ist es nur nötig, sie anders zu formulieren. Die neuere Anschauung von Elster und Geitel, die ein Abprallen an der Unterseite des großen Tropfens annimmt, muß wieder fallen gelassen werden, weil die Vorzeichen an den Tropfen nicht mit der Erfahrung stimmen. Man muß entweder zu der älteren Auffassung von 1885 und 1890, die von einer Trennung an der Oberseite des Tropfens ausging, zurückkehren oder aber statt des Herumgleitens oder Abpralls zweier Tropfen das Zerreißen, „Zerfahren“, eines Tropfens im elektrischen Feld als elektrisch wirksam annehmen. Diese zweite Möglichkeit vermeidet nicht nur die Schwierigkeit der Vorzeichen, sondern gleichzeitig auch den Einwand von Simpson wegen der Berührung der Tropfen.

Zunächst das Zerfahren der Tropfen. Simpson und Elster und Geitel halten zwar auf Grund der Lenardschen Versuche von 1904 es für unmöglich, daß durch bloßen Zerreißen der Tropfen Elektrizität entstehen kann. Nun sind aber Lenards Versuche, die stets ohne Gegenwart eines elektrischen Feldes ausgeführt wurden, hier nicht ohne weiteres anwendbar. Es wäre wohl lohnend, sie daraufhin zu wiederholen. In der Atmosphäre ist jedenfalls dort, wo sich die Vorgänge an den Tropfen abspielen, stets ein mehr oder weniger starkes Feld vorhanden. Lenard selbst sagt in seiner Arbeit von 1921¹⁸¹⁾ über das Zerfahren der Tropfen: „Das Zerfahren kommt zustande, wenn die Oberflächenschichten des Tropfens bei ruhigem Schweben desselben Zeit haben, dem nach aufwärts gerichteten wirbelfreien Luftstrom unter dem Einfluß der tangential gerichteten Reibungskraft zu folgen, ohne daß der Tropfen zerrissen wird, wobei in demselben ein Wirbelring sich ausbildet, der sich dann öffnet und nachher in Tropfen zerfällt.“ Allerdings fügt er hinzu: „In der freien Atmosphäre spielt der Vorgang in seiner reinen Form wohl nur selten eine Rolle, da genügende Schwankungen des nach aufwärts gerichteten Luftstroms wohl meist nicht fehlen.“ Ich möchte nach dem heutigen Stand der Kenntnis von der Bewegung in der Atmosphäre annehmen, daß

¹⁸¹⁾ Siehe Seite 133.

weit eher als ein Zerblasen ein Zerfahren der Tropfen eintreten wird. Auch Lenard verschließt sich dem nicht, denn er sagt an derselben Stelle: „Immerhin müßte bei wasserreichen groß tropf igen Regen, wenn dieselben ohne starke Elektrizitätsentwicklung ablaufen, angenommen werden, daß derartiges Zerfahren der Tropfen durch Übergreifen der Luftbewegung vom Umfang aus nach innen ohne das elektrisch wirk-same Zerblasen in feinste Teile stattfindet, wenn auch natürlich nicht immer ganz in der reinen im stetigen Luftstrom eines Ventilators zu beobachtenden Form/⁴ Dieser in bezug auf die Wasserfallwirkung bei Lenards Versuchen unelektrische Vorgang wird nun im Felde der Atmosphäre doch ein elektrischer Vorgang, so daß genau dieselbe Elektrisierung zustande kommt, als wenn die Lenardwirkung wirklich stattgefunden hätte: die großen Tropfen werden positiv, die nach oben herausgerissenen kleinen Tropfen negativ elektrisch. Auch der in bezug auf die Lenardwirkung schon so sehr elektrische Vorgang des Zerblasens wird in der Atmosphäre durch die im selben Sinne wirkenden Influenzvorgänge noch elektrisch wirksamer.

Man könnte sich den Vorgang des Zerfahrens auch folgendermaßen denken. Der Tropfen hat, vor allem wenn er größer ist, nicht mehr Kugelform, sondern ist deformiert, und zwar so, daß er seine größte Oberfläche dem Luftstrom entgegenstellt. Nun sind aber die horizontalen Strömungen stets viel stärker als die vertikalen. Der Tropfen wird sich neigen müssen. Dadurch muß er infolge der Schwerkraft sich unten verdicken. Dieses Ende wird durch Influenz positiv, das dünnere obere Ende negativ elektrisch. Beim Zerfahren wird am leichtesten das obere Ende abgetrennt werden können. Bei Landregen wird die Wirkung wegen der meist nicht starken Luftströmungen klein bleiben. Bei Böen dagegen sind wegen der heftigeren Kondensation die Tropfen größer, die Wolkenelemente ebenfalls größer und zahlreicher, die Bewegungen in der Wolke viel stärker. Das Zerfahren wird viel häufiger, aber auch wechselnder vor sich gehen. Dazu kann unter Umständen noch das Zerblasen und die Lenardwirkung kommen. Es ist also kein Wunder, wenn jetzt die Ladungen sehr groß werden und im Vorzeichen stark wechseln. In Mitteleuropa gelangen bei den Gewittern annähernd gleichviel positive und negative Regen zum Erdboden, d. h. alle in der Wolke erzeugte Elektrizität wird zur Erde geführt. Eine längere Unterbrechung oder Änderung des normalen Feldes tritt also dadurch nicht ein. In den Tropen könnte das anders

sein. Vermutlich ist hier das Zerblasen stärker, die positiven Regen überwiegen mehr. Gleichzeitig tritt durch die in der Luft verbleibenden negativen Lädungen eine längere Schwächung des normalen Feldes ein.

Die zweite, oben erwähnte Möglichkeit, daß entsprechend der älteren Elster und Geitelsehen Anschauung ein Herumgleiten an den großen Tropfen eintritt, wird nur bei garnicht oder wenig deformierten Tropfen, also nur bei ruhigen atmosphärischen Bedingungen in Betracht kommen. Ich möchte annehmen, daß die Elektrisierung bei Landregen, wo ein Zerfahren seltener eintreten muß, zum Teil dem Abgleiten der Nebeltröpfchen an der Oberseite der größeren Tropfen zu danken ist. Die Vorzeichen sind genau die gleichen wie beim Zerfahren und Zerblasen. Bedenklich bleibt hier der Einwand, daß eine elektrisch wirksame Berührung durch eine Luftzwischen-schicht verhindert wird. Es wird nötig sein, diese Frage durch Versuche zu klären.

Ganz anders werden die Verhältnisse, wenn, was bei Böen und Gewittern die Regel ist, auch Niederschläge fester Form auftreten. Dann wird sehr kräftig auch das Abprallen der Nebelteilchen an der Unterseite der festen Teilchen auftreten, also eine Elektrisierung, welche der bei Landregen gerade entgegengesetzt ist. Graupel und Hagelkörner werden dabei negativ elektrisch, die abprallenden Nebelteilchen positiv. Ein großer Teil dieser Körner schmilzt unterwegs und gelangt als Tropfen zum Boden. Auch an den Tropfen kann vielleicht ein Abprallen von der Unterseite vorkommen. Das immerhin ziemlich häufige Umkehren der Vorzeichen bei den Landregen wird man darauf zurückführen können. Die Ursache müssen Änderungen der Luftströmung in der Wolke sein.

Noch weniger wie bei den Graupeln wird man bei den Schneeflocken ein Herumgleiten der Nebeltröpfchen am Kristall erwarten können. Auch beim Schnee tritt also die Trennung vorzugsweise auf der Unterseite ein. Nach Wegener*) ist der horizontale Durchmesser der großen Schneeflocken fast immer größer als der vertikale. Meist ist der Außenrand durch den Luftwiderstand gehoben, so daß das ganze Gebilde mehr oder weniger nach unten konvex ist. Die Flocken rotieren nie um eine horizontale, dagegen fast immer langsam um eine vertikale Achse, wobei ihre Fallbahn nicht geradlinig verläuft, sondern eine schraubenförmige, wenn auch meist nur schwach gekrümmte Linie

*) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre S. 287, 306, 316.

darstellt. Auch fallende Kristallplättchen nehmen bald eine horizontale Lage an. Wegen der horizontalen Strömungen werden sie aber stets etwas geneigt sein müssen. Ein Abprallen an der Unterseite der Kristalle oder am unteren Ende der Plättchen ergibt die umgekehrten Vorzeichen wie beim Zerfahren der Tropfen und beim Herumgleiten; die Schneeflocken werden vorzugsweise negativ, die Nebeltröpfchen positiv, in Übereinstimmung mit der Erfahrung. Es ist also nicht nötig, wie das Schindelbauer tat, für die Erklärung der Schnee-Elektrizität ein umgekehrtes Feld in der Wolke anzunehmen, eine Annahme, die von Simpson auch gegenüber Elster und Geitel bekämpft worden ist. Das Potentialgefälle bei Schnee wird sich auch am Erdboden nicht umkehren können wie bei Landregen, sondern durch die leichteren in der Luft verbleibenden positiven Nebeltröpfchen eher noch verstärkt werden, wieder in Übereinstimmung mit der Erfahrung, vor allem mit den Raumladungsmessungen von Kahler.

Nun kann aber bekanntlich der Schnee auch häufig positive Eigenladungen tragen. Meistens ist dann das Potentialgefälle am Erdboden, sowie die Raumladung negativ. Wir haben also genau dieselben Verhältnisse wie bei Landregen, demnach auch dieselben Influenz Vorgänge anzunehmen, d. h. entweder ein Abprallen der Nebelteilchen an der Oberseite der Schneeflocken, was vor allem bei einzelnen Plättchen leicht eintreten kann, oder ein Abreißen einzelner Stücke der Schneekristalle an dieser Oberseite. Das ist auch gar nicht so unwahrscheinlich. Es ist lange bekannt, daß die Flocken häufig deformiert und verletzt am Boden ankommen. Hellmann¹⁹²⁾, der eine Reihe schöner Photographien von Schneekristallen nach mikroskopischen Aufnahmen von Neuhaus in Berlin bringt, schiebt diese Verletzungen auf das Aneinanderprallen der Kristalle in stark bewegter Luft. Die Beschädigungen sind am kleinsten, wenn die Schneeflocken nur einen kurzen Weg durch die Luft zurückgelegt haben. „Gerade dann, wenn sich aus tiefliegendem Dunst oder Nebel, der blauen Himmel durchscheinen läßt, vereinzelt Schneekristalle ausscheiden, sind diese besonders regelmäßig geformt.“ Man könnte nach den Erfahrungen der elektrischen Messungen in Potsdam hinzufügen: Ferner sind sie dann fast gar nicht elektrisch. Die Bilder von Neuhaus zeigen z.B. sechsstrahlige Sterne, bei denen mehrere direkt an der Wurzel abgebrochen sind. Die Elektrisierung des Kristalls, sowie des abgetrennten Stücks wird ganz davon

¹⁹²⁾ G. Hellmann, Schneekristalle. Berlin (R. Mückenberger) 1893.

abhängen, ob die Abtrennung unten, seitlich oder oben erfolgt. Im allgemeinen wird ein Abreißen an der Oberseite eher erfolgen als an der Unterseite. Man wird auch hier wie bei den Tropfen unterscheiden müssen zwischen einem Zerfahren und Zerblasen. Beim Zerfahren haben wir einen reinen Influenzvorgang, beim Zerblasen des Kristalls in feinen Staub dagegen überwiegt die Lenardwirkung, d. h. der Schneestaub wird negativ, die großen Reststücke positiv elektrisch. Der Influenzvorgang ist unter sonst gleichen atmosphärischen Bedingungen unabhängig von der Größe des Schneekristalls. Der kleine Kristall, der sich vor allem bei tiefen Temperaturen und geringem Wasserdampfgehalt bilden muß, erhält also eine viel größere Volumenladung als der große. Da die Schneeflocken stets leichter als Tropfen sind, ist aus demselben Grunde die Volumenladung bei Schnee stets größer als bei Regen, was alle Messungen von Schneeladungen bestätigen. Da der Schnee leichter als Regen herumgewirbelt wird, werden die Influenzvorgänge bei Schnee häufiger, aber zugleich auch wechselnder sein als bei ruhig fallendem Regen, was wieder durch die Erfahrung bestätigt wird.

Daß bei einem Gemenge von Schnee und Regen, wo schon vielen Beobachtern der große Wechsel in den Ladungen aufgefallen ist, die Influenzvorgänge ganz verschieden sein können, ergibt sich ohne weiteres aus dem oben Ausgeführten. Gerade bei diesen Temperaturen ist zudem der Schnee ein ganz guter Leiter. Bei sehr tiefen Temperaturen, wo Schnee schlecht leitet, wird das Abreißen einzelner Teilchen, das Zerfahren, eine größere Rolle spielen. Der Influenzvorgang wird also einheitlicher, der Zeichenwechsel infolgedessen nicht so häufig sein. Auch das wird durch die Erfahrung bestätigt.

Bei einem ruhig fallenden runden Graupelkorn erscheint ebenfalls ein Herumgleiten des Nebeltröpfchens denkbar, so daß dann das Graupelkorn positiv, das Nebelteilchen negativ elektrisch wird. Ein rasch fallendes Hagelkorn trifft nicht nur auf Nebelteilchen, sondern auch auf größere Wassertropfen, die sich bekanntlich, indem sie sofort gefrieren, an das Korn anlagern. Bei schnellem Durchschlagen des Hagels wird nicht nur ein Zerfahren; sondern unter Umständen sogar ein Zerblasen der großen Tropfen möglich sein. Es ist also verständlich, wenn der Hagel sich häufiger positiv als negativ geladen erweist.

Man sieht, eine wie erstaunliche Mannigfaltigkeit in den Ladungen der Niederschläge durch den Influenzvorgang eintreten kann. Die von

Elster und Geitel entwickelte Anschauung erweist sich als ungemein fruchtbar. Daneben muß als ihr Hauptvorzug angesehen werden, daß sie im Gegensatz zur Wasserfalltheorie Regen-, Schnee- und Gewitterelektrizität auf die gleiche Weise erklärt. Die in Potsdam bei den Parallelmessungen von Potentialgefälle, Niederschlagsladung und Raumladung gefundenen Beziehungen sind anders als durch die Influenztheorie nicht zu verstehen. Die Theorie hat gewiß noch ihre Mängel. Vor allem muß sie noch durch Laboratoriumsversuche besser gestützt werden. Eines leistet die Influenztheorie allerdings nicht: Das lufterlektrische Hauptproblem, die Erklärung der negativen Erdladung, wird durch sie nicht gelöst. Sie setzt im Gegenteil stets das Vorhandensein dieser Ladung und des elektrischen Feldes in der Atmosphäre voraus.

Zusammenfassung

Die Bildung der Wolken und auch noch das Ausfällen der Niederschläge in ihr geht ohne sonderliche Elektrisierung der Wolkenelemente und der Tropfen vor sich. Die eigentlichen elektrischen Vorgänge setzen erst ein mit der Bewegung der Tropfen, also in der Hauptsache erst beim Fallen der Niederschläge. Ein Zusammenfließen von Tropfen ist elektrisch unwirksam, stark elektrisierend wirkt aber ein Zerteilen der Tropfen. Hier ist zu unterscheiden zwischen dem langsameren Zerfahren, das am häufigsten in den wechselnden Wolkenschichten eintreten muß, und dem schnelleren explosionsartigen Zerblasen der Tropfen, das wohl nur mitten in starken Böen und Gewittern vor sich geht. Beim Zerfahren werden die Tropfen elektrisch durch die Influenzwirkung des lufterlektrischen Feldes, beim Zerblasen außerdem noch durch die Wasserfall-(Lenard-)Wirkung. Zu diesen beiden grundlegenden Vorgängen treten noch mannigfaltige Influenzwirkungen des elektrischen Feldes beim Berühren und Abprallen der Tropfen, sowie vor allem der festen Niederschlagsformen unter sich und an den Wolkenelementen. Dadurch erklärt sich in erster Linie der starke Wechsel der Niederschlags- und Wolkenladungen. Das von Elster und Geitel in der neueren Fassung ihrer Influenztheorie angenommene Abprallen der kleinen Wolkenelemente an der Unterseite der großen Tropfen kommt aber für die Erklärung der Regenladungen nicht wesentlich in Betracht.

Neue Erscheinungen:

Monographien zur Geologie der Palaeontologie,

herausgegeben von Professor **Dr. W. Soergel**-Tübingen

Serie I, Heft 1: **Die Ichthyosaurier des Lias und ihre Zusammenhänge** von Professor **Dr. Frhr. von Huene**. Mit 22 Tafeln. (VII u. 114 S.) 1922. In Quartformat Geh. 36.—

Heft 2: **Die Kieselpongien der oberen Kreide von Nordwestdeutschland** von **Dr. A. Schrammen**. Mit 2 Textabb. u. 17 Lichtdrucktafeln. (VI u. 159 S.) In Quartformat Geh. 48.—

Serie II, Heft 1: **Der Buntsandstein des badischen Schwarzwalds und seine Labyrinthodonten** von Prof. **Dr. E. Wepfer**. Mit 1 Textfig. u. 18 Taf. (VI u. 101 S.) 1923 Geh. 24.—

Heft 2: **Der mittlere Jura im Hinterland von Daressalaam** von Prof. **Dr. E. Hennig**. Mit zahlr. Taf. 1924 *Unter der Presse*

Die oben angegebenen Preise der „Monographien“ sind Vorzugspreise, die nur bei Abnahme von mindestens 4 Heften Gültigkeit haben. Beim Kauf einzelner Hefte erhöht sich der Preis um $33\frac{1}{3}\%$

Zeitschrift für angewandte Geophysik, herausgegeben von **Dr. Richard Ambronn**, Göttingen. Bandl. 24.—

Aus dem Inhalt der bisher erschienenen Hefte:

Richard Ambronn, Die Aufgaben der angewandten Geophysik.

*K. Mack, Die Ermittlung der Herdentfernung eines Erdbebens mittels Oberflächenwellen

C Malnka, Ortsbestimmung von Erdbebengebieten mit Hilfe des Zeitunterschiedverfahrens und anderes

B. Gutenberg, Neue Methoden zur Bestimmung der Herdtiefe von Erdbeben aus Aufzeichnungen an herdnahe gelegenen Stationen

H. Haalok, Untersuchungen über die normale Gestalt der Erde und die Massenlagerung in ihrem Innern

B. Gutenberg, Über den Erdkern in 2900 km Tiefe und die an ihm stattfindenden Reflexionen und Brechungen von Erdbebenwellen

H. Haalok und G. Brlnokmeier, Erdmagnetische Untersuchungen am Saltstock der Burbacher Achsenzone bei Wefensleben

K. Stumpf, Periodogramme und ihre Anwendung auf astronomische und geophysikalische Fragen

S. v. Bubnoff, Über die magnetischen Anomalien im Gouvernement Kursk

E. Tams, Zur Frage der täglichen Perioden in der Stoßfrequenz der vogtländischen Erdbebenschwärme

A. Wagner, Eidmagnetische Messungen zwecks Aufsuchung isolierter schwachmagnetischer Erzlager

Sammlung geophysikalischer Schriften heraus-
gegeben von Professor **Dr. Carl Mainka**, Göttingen,

Heft 1: **Physik der Erdbebenwellen** von **C. Mainka**. Mit 35
Textfig. und 20 Tabellen (VIII u. 156 S.) 1923. Geh. 9.—

Heft 2: **Geotektonische Hypothesen** von Prof. Dr. Fr. Nölke,
Bremen (VIII u. 123 S.) 1924. Geh. 4.80

Heft 3: **Seismische Bodenunruhe** von **Dr. B. Gutenberg**, Darm-
stadt. Mit 8 Textfig. *Unter der Presse*

GeOLOGISCHe RundSCHaU, Zeitschrift für allgemeine Ge-
ologie, herausgegeben von der Geologischen Vereinigung unter
der Schriftleitung von **G. Steinmann**, **O. Wilckens**, **H. Cloos**
Band XIII und Band XIV je 18.—
Band XV *Im Erscheinen*

Aus dem Inhalt der letzten Hefte:

G. Steinmann, Über die junge Hebung der Kordillere Süd-
amerikas. (Mit 1 Textfigur)

O. A. Weiter, Zur Genesis der goldhaltigen Arsenerze von
Reichenstein in Schlesien. (Mit 2 Textfig. u. 2 Tafeln)

A. Tornquist, Intrakretazische und alttertiäre Tektonik der
östiichen Zentralalpen

E. Krenkel, Die Bruchzonen Ostafrikas. (Mit 3 Textfiguren)

H. M. E. Schürmann, Über die neogene Geosynklinale von
Südsumatra und das Entstehen der Braunkohle. (Mit
2 Textfiguren und 1 Tafel.)

W. Schiller, Seltsame Spannungserscheinung u. Bacherosion
in devonischem Schiefer (mit 3 Textfiguren).

M. Weber, Die Protoblastese.

C. Elschner, Beiträge zur Kenntnis von natürlichen und künst-
lichen Seewasserlagunen.

S. v. Bubnoff, Über geologische Grundtheorien.

Ferner: Geologischer Unterricht und Zeitschriftenschau

**Grundzüge einer Physioklimatologie der Fest-
länder** von Dr. Wilh. R. Eckardt. Mit 17 Textfig. Geh. 7.20

Sammlung Borntraeger

Unter dem Titel „Sammlung Borntraeger“ soll *eine*

„Sammlung von Grundzügen und Grundlagen aus dem Gesamtgebiete der Naturwissenschaften“

geschaffen werden. Diese Sammlung bringt Abrisse, die bei aller Kürze streng wissenschaftlich gehalten und für Studierende wie für solche Kreise berechnet sind, die in gedrängter Form sich über ein bestimmtes Sondergebiet zu unterrichten wünschen. Maßgebend für die Schaffung einer solchen Sammlung sind für die Verlagsbuchhandlung in erster Linie auch die Nöte der Zeit. Denn es kann kein Zweifel darüber bestehen, daß eine gründliche wissenschaftliche Ausbildung der Studierenden ebenso wie das für den Beruf notwendige Schritthalten mit der Forschung bei den bereits in Amt und Würden stehenden Akademikern angesichts der enormen Teuerung auf die größten Schwierigkeiten stößt. Vor allem zwingen die gewaltigen Kosten des Hochschulstudiums den Jünger der Wissenschaft heute zu einer möglichst raschen Abschlußprüfung; er wird daher an Vorlesungen nur das hören, was er als allgemeine Grundlage seiner wissenschaftlichen Bildung unbedingt braucht. Eine notwendige Folge davon wird sein, daß mancher wichtige Wissenszweig vernachlässigt wird, der doch „als Grenzgebiet“ oft die natürliche Brücke zwischen seinen Haupt Studienfächern bildet und als solche seine eigentliche wissenschaftliche Fachbildung zu ergänzen und überhaupt erst abzurunden berufen ist. Es liegt auf der Hand, daß sich auf diese Weise gerade beim Naturwissenschaftler im Wissen leicht Lücken einstellen werden, deren Beseitigung unbedingt anzustreben ist.

Diesem Zweck suchen die geplanten Bücher der vorstehenden Sammlung, die in einem Umfang von etwa 15 Druckbogen erscheinen werden, mit in erster Linie zu dienen. Ferner sind sie gewissermaßen als Repetitorien geeignet, altes Wissen neu zu befestigen, endlich wollen sie unter ausführlicher Nennung der wichtigsten Literatur die Kenntnisse des Naturwissenschaftlers vor allem erweitern und vertiefen, sowie neue Anregungen für Forschung und Beruf geben. Jedes einzelne Gebiet, das in einem Bande behandelt wird, ist in sich abgeschlossen, aber dennoch stehen alle Bände in innigem Zusammenhang untereinander. Selbstverständlich sucht die Sammlung ihre Aufgabe nicht in der Vorführung von unbewiesenen Hypothesen, sondern ihre Bände sollen einen klaren Überblick über die gefestigten Ergebnisse der Forschung nach ihrem neuesten Stande bieten. Bei dem mäßigen Umfange der einzelnen Bände in denen hervorragende Fachmänner ihr Bestes bieten, wird auch besonderes Gewicht darauf gelegt, daß der Preis der Bücher für jeden Akademiker erschwinglich ist.

Sammlung Borntraeger

In Vorbereitung befindliche Bände:

Baur, Grundlinien der Pflanzenzüchtung: liegt bereits vor
Boegehold, Grundzüge der geometrischen Optik und ihrer Anwendungen
Braun, Grundzüge der Veränderungen des deutschen Landschaftsbildes
Dacqué, Grundlinien der Stratigraphie und Palaeogeographie
Dänzel, Grundzüge der allgemeinen Völkerkunde mit besonderer Berücksichtigung völkerpsychologischer Gesichtspunkte
Diener, Die geologisch-palaeontologischen Grundlinien der Abstammungslehre
Dietrich, Grundrisse der Verkehrsgeographie
Dietrich, Grundrisse der Wirtschaftsgeographie
Drecker, Anwendung der Astronomie in der Zeitbestimmung und in der Astrologie
Eckert, Die natürlichen Grundlinien der Anthropogeographie
Erhard, Physiologie der Tiere
Fischer, Grundzüge der Stoffwechsel-Physiologie der Pflanzen
Gothan, Grundzüge der Systematik und Biologie der fossilen Pflanzenwelt
Hapraeier, Grundzüge der Meeresbiologie
Hassert, Grundrisse der Städtegeographie
Hauschild, Grundrisse der Anthropologie
Hayek, Allgemeine Pflanzengeographie
Henning, Grundzüge der Psychologie
Hilzheimer, Grundzüge der Biologie und Stammesgeschichte der Haustiere
Kahler, Die Elektrizität der Gewitter
Knopf, Grundrisse der Astronomie
Mangold, Grundzüge der allgemeinen Physiologie
Mattfeld, Grundzüge der genetischen Pflanzengeographie
Morstatt, Einführung in die Pflanzenpathologie: liegt bereits vor
Passarge, Grundzüge der gesetzmäßigen Charakterentwicklung der Völker und ihre Bedeutung für das gesamte Kulturleben
— Grundzüge einer Landschaftskunder einzelner Erdteile und ihrer Staaten
Rensch, Grundzüge der wissenschaftlichen Ornithologie
Rüsewald und Schäfer, Grundlinien einer allgemeinen Siedelungskunde
Sarnetzky, Grundzüge der terrestrischen und Luftphotogrammetrie
Schmitt, Grundzüge der Atomtheorie
Schróder, Die exakten Grundlagen der okkulten Phaenome
Sokokowsky, Grundzüge der Tiergeographie (ökologische Tiergeographie)
Volz, Grundzüge der physikalischen Erdkunde des australisch-asiatischen Archipels
Wedemeyer, Grundzüge der Kartographie
Wegemann, Grundzüge der mathematischen Geographie
Weickmann, Grundzüge der theoretischen Meteorologie
Weigold, Die Grundlinien des Vogelzuges
Würschmidt, Grtmdzüge der Geophysik

Weitere Bände befinden sich in Vorbereitung

