

ZUR KONDENSATION DES WASSERDAMPFES IN DER ATMOSPHERE.

VON
HILDING KÖHLER

ZWEITE MITTEILUNG

(Manuskript eingeliefert 19. April 1921)

Einleitung

Diese Mitteilung aus meinen Untersuchungen über das Wasser in der Atmosphäre habe ich in zwei Kapitel zerlegt.

Das erste Kapitel enthält einige Ergebnisse dieser Untersuchungen unter 0° . Dabei war es notwendig die Dampfspannungsformel etwas näher zu studieren. Die Behandlung der Formel gibt nichts Neues und ist nicht streng, wird aber mitgenommen um gewissermassen eine Motivierung der Formel zu* geben. Nach dieser Darlegung behandle ich die für das folgende wichtige Salzlösung. Die eutektische Lösung von NaCl wird als Ausgangslösung angewandt, und die Radien der Tröpfchen werden durch diese und durch die Grösse der Salzpartikelehen ausgedrückt. Mit Hilfe der veränderten Formel werden dann die Grenztröpfchen berechnet und schliesslich die Möglichkeit der Frostübersättigung nachgewiesen.

Danach gehe ich zu den experimentellen Untersuchungen über. Zuerst werden die angewandten Methoden beschrieben. Ich entwickle dann näher das Ziel meiner Untersuchungen. Es ist mir vor allem von Wichtigkeit einen experimentellen Beweis für die allgemeine Existenz der sogenannten unterkühlten Tröpfchen zu führen. Die Existenz solcher Tröpfchen wird fast eine Konsequenz des Vorkommens von Salz. Es muss indessen durch Untersuchungen klargelegt werden, ob das Vorkommen dieser Tröpfchen die Regel ist, oder ob sie nur unter bestimmte Umstände auftreten. Nachdem dies Problem erledigt ist, beschreibe ich meine Ergebnisse der Untersuchungen über die Schneebildung. Es ist mir dabei viel daran gelegen die Darlegung so hypothesenfrei wie möglich zu machen. Die hier nur aus experimentellen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse liefern neue Beweise für die Bedeutung des aus dem Meere emporgetriebenen Salzes für die Kondensation.

Im zweiten Kapitel behandle ich meine Untersuchungen über Tröpfchengrössen. Ich habe Häufigkeitsmaxima für bestimmte Tröpfchen gefunden. Auf Grund dieses Ergebnisses teile ich die Tröpfchen in Gruppen ein, und es wird sich zeigen, dass zum wenigsten eine Gruppe durch einen bestimmten Kondensationskern definiert ist. Aus anderen Untersuchungen folgt mit grösster Wahrscheinlichkeit, dass auch jede andere Gruppe durch einen bestimmten Kondensationskern definiert werden kann. So ist die Gruppe, die den Radius 7.10^{-4} cm. enthält (die 7-Gruppe oder MgNa-Gruppe) vielleicht durch die Meeressalze bestimmt, eine andere Gruppe wird durch Ammonium bestimmt u. s. w.

Die kleinsten Partikelchen der Tröpfchen sind auch in eine Serie eingeteilt. Wenn m die Masse eines Moleküls ist, ist die Grösse der Partikelchen gleich 2^m .

In Noten werden schliesslich einige meiner Erfahrungen, die ich in der Abhandlung, ohne den Zusammenhang zu zerbrechen, nicht hätte mitnehmen können, kurz besprochen. Dabei werden die verschiedenen Arten von Nebelfrost exakt definiert.

Mein ganzes Material kann hier nicht mitgeteilt werden, sondern wird später in einer etwas grösseren Arbeit¹ in Geophysische Publikationen veröffentlicht. Alle die hier erwähnten Untersuchungen führe ich bei jeder Gelegenheit weiter und suche dadurch immer grössere Genauigkeit zu erzielen. Es würde mich indessen ausserordentlich freuen, wenn Meteorologen und Physiker andernorts ebenfalls solche Untersuchungen ausführten. Es wird sich nämlich zeigen, dass man an verschiedenen Stellen sicherlich verschiedene Ergebnisse erhalten wird, und für das Problem der Kondensation ist es von grösster Wichtigkeit die Ursache dieser Verschiedenheit, die ich angedeutet, exakt mathematisch darlegen zu können. So ist der Weg, das Kondensationsproblem vollständig zu lösen, angewiesen.

Kapitel 1.

Über die angewandten Formel. — Für die folgenden Rechnungen wird eine andere Formel der Dampfdruckerhöhung angewandt als diejenige in der früheren Abhandlung. Es ist daher berechtigt diese Formel etwas näher zu studieren. Für eine Sphäre oder den Meniscus der Flüssigkeit in einem vollkommen benetzten zirkulärzylindrischen Rohr gilt sehr nahe folgender Ausdruck:²

$$(p - p_0) \cdot v' - p_0 \cdot v''_0 \cdot \ln(p/p_0) + \frac{2v's}{r} = 0 \quad (1)$$

wo:

p = Dampfspannung der krummen Oberfläche

p_0 = — » ebenen —

v' = sp. V. der Flüssigkeit, als konstant betrachtet

v''_0 = sp. V. des Dampfes an der ebenen Oberfläche

\ln = natürlicher Logarithmus

s = »Kapillaritätskonstante«³

r = Radius der Sphäre oder des Rohres, negativ, wenn er von der Flüssigkeit gerichtet ist.

Diese Formel kann aus thermodynamischen Betrachtungen hergeleitet werden. Hier wird eine Herleitung gegeben, die freilich nicht so wissenschaftlich tief und streng ist, die aber die Bedeutung der verschiedenen Glieder recht klar hervorhebt.

¹) Ich hoffe da die hier in sehr gedrängter Form erwähnten Ergebnisse breiter darstellen und sie in Verbindung mit anderen meteorologischen und physikalischen Phänomene betrachten zu können. Ich hoffe da auch die Ergebnisse der früher kurz erwähnten Messungen des Wassergehaltes der Wolken behandeln zu können, die ich mit einer Methode ähnlich derjenigen von *Conrad* (Denkschr. der mathem.-naturwissensch. Klasse der K. Akademie der Wissenschaften, Wien 1901) ausgeführt habe.

²) *Voigt*, Thermodynamik, T. 2 S. 132.

³) Konstante ist nicht richtig, weil s mit Salzkonzentration und Temperatur schwankt. Da s im allgemeinen die Kapillaritätskonstante genannt wird, ist natürlicherweise hier nicht der Ort eine Veränderung einzuführen.

Wenn das System, Flüssigkeit und Dampf, der Schwere unterworfen ist, und wenn eine ebene Grenzfläche in der Höhe $z = 0$ liegt, hat man wie bekannt folgende Formel¹⁾:

$$g \cdot z (1/v' - 1/v'') = - \frac{2s}{r} \quad (2)$$

$v'' =$ sp. V. des Dampfes

$z =$ Höhe des Meniscus über der ebenen Oberfläche.

Andere Bezeichnungen wie früher.

Ich betrachte eine Flüssigkeit, die in einem Kapillarrohre steigt. Dabei ist $r < 0$. Das linke Glied ist gleich der Differenz der hydrostatischen Drücke beim Meniscus in der Flüssigkeit und im Dampfe. Wir haben also im Meniscus eine Diskontinuitätsfläche des hydrostatischen Druckes. Daraus folgt approximativ:

$$p_1 - p = \frac{2s}{r} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = \text{Druck in der Flüssigkeit} \\ p = \text{ » - dem Dampfe} \end{array} \right\} \text{ beim Meniscus}$$

Für die Flüssigkeit gilt weiter, wenn p_0 der hydrostatische Druck in der ebenen Oberfläche ist:

$$(p_1 - p_0) \cdot v' = -gz \quad (4)$$

Für den Dampf gilt:

$$v_0'' \cdot p_0 \cdot \ln(p/p_0) = -gz \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (4) und (5) erhalten wir

$$v' (p_1 - p_0) - v_0'' \cdot p_0 \cdot \ln(p/p_0) = 0$$

Wir hatten aber (3):

$$v' (p_1 - p_0) = \frac{2sv'}{r} + v' (p - p_0).$$

Also (1):

$$v_0'' p_0 \ln(p/p_0) - v' (p - p_0) = \frac{2sv'}{r}$$

Die Formel, die in der ersten Mitteilung angewandt wurde, war die folgende:

$$p - p_0 = \frac{2sv'}{(v'' - v') r} \quad (6)$$

Diese erhält man direkt aus (2), wenn man annimmt, dass $gz = (p_0 - p) v''$, dass also v'' konstant von $z = 0$ bis z ist. Dieselbe Formel erhält man aus (1), wenn man den Logarithmus nach Potenzen von $\frac{p - p_0}{p_0}$ entwickelt und höhere Potenzen davon vernachlässigt.

Nimmt man dagegen an, dass v'' mit der Höhe schwankt und den Ausdruck $p_0 v_0'' = RT$ berücksichtigt, erhält man

¹⁾ Voigt, l. c. In Winkelmanns Handbuch der Physik findet man eine sehr klare Darstellung der Kapillaritätstheorie von F. Pockels.

$p_0 v_0'' \ln(p/p_0) = -gz$, warum man nach (2) hat:

$$p_0 v_0'' \ln(p/p_0) \left(\frac{v'' - v'}{v'' v'} \right) = \frac{2s}{r}$$

oder wenn $\frac{v'}{v''}$ gegen 1 vernachlässigt wird:

$$p_0 \ln(p/p_0) = \frac{2sv'}{v_0'' r} \quad (7)$$

Dieselbe Formel erhält man aus (1), wenn darin $v'(p - p_0)$ vernachlässigt wird.

Die Formel (7) wird nachher angewandt. Ihre direkte Herleitung ist physikalisch richtiger als die der Formel (6). Für Rohre mit einem Radius von 10^{-5} cm. wird die Steighöhe schon über 100 Meter, und die Veränderung von v'' mit der Höhe kann nicht unberücksichtigt gelassen werden. Für kleine Radien kann die Formel (6) daher nicht so gute Werte geben wie die Formel (7). Aus (1) sieht man auch leicht, dass das Glied $v'(p - p_0)$ gegen den Logarithmus in diesem Falle vernachlässigt werden kann.

Die Formel (7) ist ausserdem in gewissem Masse experimentell geprüft und hat gute Ergebnisse¹ gegeben.

Beim Übergang zu den Briggschen Logarithmen und bei der Einsetzung von T und p_0 anstatt v_0'' , erhält man:

$$\text{Log } p - \text{Log } p_0 = \frac{2sv' \cdot 0.4343 \cdot 0.2885 k}{T 10^3 r}$$

(k ist eine Konstante, die eingesetzt werden muss, um Gleichheit in den Einheiten zu bekommen)

weil

$$v_0'' = \frac{T 10^3}{0.2885 p_0}$$

Über die Salzlösung. — In einer Note der vorigen Mitteilung² erwähnte ich kurz, dass ich Magnesium im Nebelfrost gefunden habe. Ich will dies hier bestätigen. Bei zwei Gelegenheiten, wo die Chlormenge klein war, die Nebelfrostablagerungen aber sehr gross, führte ich Analyse auf Magnesium aus. Zu diesem Zwecke sammelte ich Nebelfrost in so grossen Mengen, dass ich 10 Liter Schmelzwasser erhielt. Nach dem Eindampfen dieser Menge zu einem passenden Volum, wurde die Analyse ausgeführt. Zunächst wurde Calcium qualitativ nachgewiesen und aus der Lösung wegfiltriert. Die Menge von Calcium war allzu winzig um mit wünschenswerter Genauigkeit quantitativ gemessen zu werden, warum ich darauf verzichtete. Das Filtrat wurde dagegen auf Magnesium quantitativ analysiert.³ Als Verhältnis zwischen der gefundenen Anzahl Moleküle Chlor und der des Magnesiums fand ich:

1. 6.2
2. 10.6

¹⁾ R. Zsigmondy, Kolloidchemie S. 229.

²⁾ Hilding Köhler: Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre, Erste Mitteilung, Geophysische Publikationen Vol. II. No. 1, S. 12, 1921, oder Met. Zeit., Hefte 6, S. 170 (1921).

³⁾ Zur Kenntnis der Analyse von Ca und Mg weise ich auf Dr. Max Dittrich: Anleitung zur Gesteinsanalyse, Leipzig 1905, S. 31–34, hin. Zur Bestimmung von Cl siehe O. Kühling, Lehrbuch der Massanalyse, Stuttgart 1904, S. 144.

Nach *Krömmel* schwankt im allgemeinen im Meereswasser dies Verhältnis zwischen 10.1 und 9.7. Die Abweichung meiner ersten Analyse ist also nicht unbedeutend. Sie ist in diesem Falle jedoch dadurch erklärlich, dass das Material aus sehr verschiedenen Arten von Nebelfrost bestand. Mit Rücksicht darauf und auf die Schwierigkeiten diese winzigen Mengen zu bestimmen, muss die Übereinstimmung hinreichend sein um den Schluss ziehen zu können, dass die früher angenommene Verteilung der Salze richtig und gleich derjenigen im Meere ist. Zu bemerken ist, dass der Nebelfrost von Osten abgelagert war.

Die kleinen Mengen von anderen Salzen als NaCl spielen für sehr konzentrierte Lösungen eine nicht unwesentliche Rolle. Die Magnesiumsalze haben wegen ihrer grossen hygroskopischen Eigenschaften, und die Calciumsalze wegen ihrer relativen Schwerlöslichkeit, Bedeutung. Es war mir indessen unmöglich, hinreichend genau bestimmte Konstanten für Lösungen mit einer Zusammensetzung zu finden wie die hier in Frage kommende.

Ich bediene mich hier nur einer Kochsalzlösung. Es wird dabei angenommen, dass die Kochsalzmenge gleich der Summe aller Meeressalze¹ ist. Infolge dieser Annahme erhält man für die Dampfspannung, die für so verdünnte Lösungen, dass die Formel (2) der ersten Mitteilung gilt, höchstens 0.01 mm. zu niedrige Werte. Für konzentrierte Lösungen erhält man dagegen aller Wahrscheinlichkeit nach zu hohe Dampfspannung über den Tröpfchen. Der Fehler ist für die Konzentrationen, die hier in Frage kommen werden, immer zu vernachlässigen. Mit hinreichender Genauigkeit rechne ich also hier mit der erwähnten NaCl-Menge. Das Gewicht der totalen Salzmenge ist im Folgenden von so grosser Bedeutung, dass ich darauf verzichte eine eventuelle Korrektur anzuwenden, die mit der Konzentration veränderlich sein muss.

Eine Chlornatriumlösung von 224 Gramm per 1000 gr. Lösung gefriert bei einer Temperatur von -21.2° , da eine Mischung von Eis und Chlornatrium mit zwei Wassermolekülen per Molekül Salz ausfällt. Ist die Lösung konzentrierter, fällt bei sinkender Temperatur Salz aus, bis die Lösung die obengenannte Temperatur erreicht hat. Ist die Lösung verdünnter, fällt Eis aus, bis diese Konzentration und diese Temperatur erreicht sind. Die Temperatur -21.2° und die obengenannte Konzentration definieren für Chlornatrium den eutektischen Punkt.

Die Grösse der Salzpartikelchen, die als Kondensationskerne auftreten, schwankt. Die Menge 10^{-14} gr. spielte in der ersten Mitteilung eine gewisse Rolle. Ich gehe in meinen folgenden Rechnungen von dieser Menge mit einem Parameter α^3 multipliziert aus. In der Tat nehme ich in jedem Tröpfchen eine Salzmenge gleich $\alpha^3 \cdot 10^{-14}$ gr. an. Weiter gehe ich in meinen Betrachtungen von einer Konzentration aus, die 224 gr. per 10^3 gr. Lösung entspricht. Für das Studium der Konzentrationsschwankungen wird ein Parameter β angewandt, und zwar so dass die dritte Potenz dieses Parameters ein Faktor des Gewichts der Lösung wird. Ich behandle also Lösungen mit 224 gr. Chlornatrium in $\beta^3 \cdot 10^3$ gr. Lösung. Die Dichte der Lösung ist von β abhängig. Der Radius eines Tröpfchens von der Konzentration 224 gr. Chlornatrium per $\beta^3 \cdot 10^3$ gr. Lösung mit einer Salzmenge gleich $\alpha^3 \cdot 10^{-14}$ gr. ist:

$$r = \alpha \cdot \beta \cdot 2.2 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{v} \quad (8)$$

Für eine andere Lösung als die des Chlornatriums wie z. B. für Meereswasser gilt derselbe Ausdruck für den Radius nur mit der Veränderung, dass die Konstante 2.2

¹⁾ In Met. Zeit. 1921 Heft 12, S. 359 habe ich im Aufsätze: »Über die Tröpfchengrössen der Wolken und die Kondensation« eine Menge NaCl angewandt, ohne die anderen Meeressalzen mitzunehmen.

eine andere wird. Diese Veränderung beruht darauf, dass der eutektische Punkt verschoben wird. Dieser für unsere Untersuchungen wichtige Punkt wird künftig immer als Ausgangspunkt gewählt. Der Radius ist also von drei Parametern abhängig. Dies ist jedoch nur scheinbar, da v' eine Funktion von β ist. Von grosser Bedeutung ist, dass der Radius nur mit a und β schwankt. Ist also ein Salzpartikelchen tausendmal schwerer als 10^{-14} gr., wird der Radius nur zehnmal grösser bei konstanter Konzentration. Hat dagegen a einen bestimmten Wert und wird β^3 tausendmal grösser, wird der Radius sehr nahe zehnmal grösser. In der früheren Mitteilung war es einleuchtend, welche Bedeutung die kleinen Schwankungen des Radius bei bedeutenden Konzentrationsveränderungen hatten.

Grenzwerte von a und β . — Es ist schwer, richtige Grenzwerte für a nach unten zu setzen. Wenn a für die aus dem Meere getriebenen Salze studiert wird, muss erstens erforscht sein, welche Wirkung die Winde auf die Meeresoberfläche ausüben.

In seinen Studien über Wasserfallelektrizität¹ sagt *P. Lenard* über die Abtrennung kleinster Flüssigkeitspartikel aus der Oberfläche: »Wir nehmen an, dass das Wesentliche aller wirksamen Vorgänge *Abtrennung kleinster Wasserpartikel aus der äussersten Oberflächenschicht* sei. Solche Abtrennung kann nur stattfinden, wenn grosse und zwar auf die äusserste Oberflächenschicht lokalisierte Beschleunigungen in der Wassermasse auftreten, und solche Beschleunigungen können in der Tat sehr gut durch einen in Wirbel sich auflösenden Luftstrom von aussen her dem Wasser beigebracht werden — wie am Zersprüher.« Er erwähnt danach in einer Note, wie in der Richtung des Luftstromes vom Rohre des Zersprühers aus Tröpfchen von einem Radius von 0.017 cm. bis zu unmessbarer² Kleinheit variieren.

Die Auflösung der Luftströme in Wirbeln über dem Meere muss ein allgemeines Phänomen sein. Es scheint mir jetzt recht natürlich, dass die Wirbelbildung über einer bewegten Meeresoberfläche gleich intensiv (wenn nicht intensiver) sein muss, wie die über dem festen unebenen Boden. Auf den sich überstürzenden Wellenbergen kann man in der Tat eine Zerprühung des Wassers etwa wie am Zersprüher sehen. Die Partikelchen, die dadurch aus der Meeresoberfläche losgerissen werden, können also sehr kleinverteilt werden. Es entsteht daher die Frage, ob es möglich ist, dass Partikelchen (Tröpfchen)

¹) *P. Lenard*, Probleme der komplexen Moleküle, Teil II, S. 29, Heidelberg 1914. In dieser Arbeit, wo Theorie und Experiment innig verknüpft sind, findet man mehrere für die Meteorologie sehr wichtige Mitteilungen. Durch Experimente ist hier in Verbindung mit Studien über die Wasserfallelektrizität dargelegt und theoretisch erklärt, wie das Zersprühen von Salzlösungen positiv geladene Tröpfchen liefert — wenn sie nicht zu gross oder zu klein sind. Diese Mitteilung kann gut erklären, warum Nebelfrostwolken positiv geladen sind — durch viele Messungen habe ich dies konstatiert. Sie kann auch für die Berechnung der Tröpfchengrösse angewandt werden, die unsere Kerne liefern. — Man findet da auch interessante Darlegungen über den Dampfdruck über einem Tröpfchen, wenn elektrische oder unelektrische Partikelchen vorhanden sind. Diese Darlegung, die ich hier nicht berücksichtigt habe, kann in der endgültigen Arbeit nicht beiseitegelassen werden, wo das dynamische Problem behandelt wird, und wo es also notwendig wird, darüber zu entscheiden, wie weit wir annehmen können, dass die aus dem Meere getriebenen Tröpfchen verdunsten, und also wie weit die Kondensation vollkommen kontinuierlich ist. Meiner Ansicht nach kann man in einer vordringenden Masse von Meeresluft einen rein kontinuierlichen Verlauf der Kondensation erwarten. Es ist indessen nicht unwahrscheinlich, dass die MgNa-Zone eine viel grössere Ausdehnung hat, und für die Kondensation in den Gebieten, wo man nicht wahre Meeresluft erwarten kann, ist es eben notwendig eine eingehende Untersuchung über die Verdunstungsverhältnisse von Tröpfchen zu machen, die vielleicht auch die möglichst minimale Wassermenge enthalten.

Ich möchte gern die Aufmerksamkeit der Lufterlektriker auf diese Probleme richten.

²) Die stärkste Vergrösserung war 250 fach. *P. Lenard* l. c.

entstehen, die so klein sind, dass sie etwa nur Chlornatrium und Magnesiumsalze mit Wasser enthalten. Es scheint mir berechtigt, die Frage mit einem Ja zu beantworten.

Man darf annehmen, dass die verschiedenen Moleküle in der Oberflächenschicht regelmässig verteilt sind. Die Anzahl der verschiedenen Moleküle ist verschieden. In der folgenden Tabelle¹ ist die Anzahl der Atome oder Atomverbindungen angegeben, die von verschiedenen Stoffen auf 10^5 Atome Chlor kommen:

Tabelle I.

Cl	Na	Mg	Ca	K	SO ₄	CO ₂	Br
10^5	85334	9933	1922	1818	5132	226	151

Chlornatrium und Magnesiumsalze kommen in grösster Menge vor. Wenn wir uns eine Ebene vorstellen, auf deren Oberfläche wir die Moleküle punktförmig abbilden, bekommen wir eine grosse Menge Punkte für Wasser, eine geringere für Chlornatrium und eine noch geringere, aber nicht zu vernachlässigende Menge für die Magnesiumsalze. Beim Losreissen eines winzigen Tröpfchens wird die Wahrscheinlichkeit des Mitfolgens von Salz-molekülen ihrer Anzahl proportional. Nach Natrium- und Magnesiumsalz kommt Calciumsulfat in grösster Menge vor. Wenn keine anderen Bedingungen berücksichtigt werden, findet man leicht, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Calcium in einem losgerissenen Tröpfchen im Radius von $3 \cdot 10^{-7}$ cm. vorkommt, nur $\frac{1}{5}$ ist (roh gerechnet). So kleine Tröpfchen verdunsten wahrscheinlich recht bald. Betrachten wir dagegen — was mir natürlich scheint — die Löslichkeit eines Salzes als eine Kraft zwischen den Wasser- und den Salz-molekülen, ist es wahrscheinlicher, dass die leichtlöslichen Salze mit dem Wasser folgen als die schwerlöslichen. Calciumsulfat ist relativ schwerlöslich. Daher kann man in einem grösseren Tröpfchen mit derselben Wahrscheinlichkeit Calcium erwarten, die Wahrscheinlichkeit, es in einem Tröpfchen von obenstehender Grösse zu finden, dürfte aber kleiner sein.

Da die Anzahl der Wassermoleküle relativ gross ist, ist also nach diesem die untere Grenze von α^3 sehr niedrig zu setzen, und diese untere Grenze hat keine praktische Bedeutung. Wir müssen daher eine praktische Grenze suchen. Nach meinen Analysen müssen alle Salze zugegen sein. Aus dieser Tatsache berechne ich die untere Grenze.

Wie bekannt ist die Masse eines Moleküls sehr genau bestimmt und kann in Gramm durch folgende Formel² ausgedrückt sein:

$$m = \frac{M}{6.09} \cdot 10^{-23} \quad (9)$$

m = Masse eines Moleküls

M = Molekülargewicht

Wenden wir diese Formel hier an, können wir das Gewicht von einem kleinsten Partikelchen berechnen. Wenn sämtlichen Salzen aber nur ein Atom Br genommen wird, erhalten wir für die möglichst kleinen Partikelchen ein Gewicht gleich $6.98 \cdot 10^{-20}$. Für

¹⁾ O. Krümmel: Handbuch der Ozeanographie. B. I, S. 220, Stuttgart 1907.

²⁾ V. Nernst: Theoretische Chemie, 7. Auflage, S. 469. In der achten bis zehnten Auflage, Stuttgart 1921 findet man S. 496–510 eine ausführlichere Darlegung über die absolute Grösse der Moleküle. 6.09 ist da durch 6.064 ersetzt. In diesem Falle wird die untere Grenze von $\alpha^3 = 7.01 \cdot 10^{-6}$ (Spätere Anmerkung).

α^3 gilt in diesem Falle $6.98 \cdot 10^{-6}$. Da die Salzverteilung nicht überall vollkommen dieselbe ist, setze ich als untere Grenze des α^3 gerade $7 \cdot 10^{-6}$.

Die untere Grenze von β^3 wird durch diese Grenze und die in der MgNa-Zone herrschenden Feuchtigkeitsverhältnisse bestimmt. Wir müssen hier darauf verzichten diese wichtige Grenze zu suchen. Wenn der Dampfdruck der Lösung bei jeder Temperatur bekannt ist, kann man durch Einsetzen von r aus (8) in die Formel (7), für jede Feuchtigkeit und jeden Wert von α , β berechnen.

Die obere Grenze von α^3 ist durch die Fallgeschwindigkeit der aufgetriebenen Tröpfchen, die Windgeschwindigkeit im Zersprühungs Augenblick und vielleicht in geringem Grade durch die herrschenden Feuchtigkeitsverhältnisse gegeben. Alle diese Faktoren in eine Rechnung zu ziehen, hat keinen Zweck. Wir können im Mittel für α^3 als rohes Maximum etwa 10^{+8} setzen. Die Partikelchen, die diesem Wert von α^3 entsprechen, sammeln sehr bald so viel Wasser, dass sie als Regen zu Boden fallen.

Die obere Grenze von β ist auch auf α beruhend, da die Tröpfchen mit grösserem α bei höherer Konzentration zu Boden fallen als die mit kleinerem. Das absolute Maximum kann nur beim absoluten Minimum für α gesucht werden. Wir wenden die von uns angegebenen Minima von α an, und finden somit für die obere Grenze des β , unter Rücksichtnahme der Tatsache, dass Tröpfchen, die einen Radius von ca. 10^{-2} cm. haben, eine so grosse Fallgeschwindigkeit erreichen, dass sie im allgemeinen aus den Wolken fallen, ein relatives Maximum aus der Formel (8). Dies ist $\beta^3 = 1.07 \cdot 10^{+13}$.

Vorbereitende Untersuchung der Formel (7). — Aus den Formeln (7) und (8) erhält man:

$$\text{Log } p = \text{Log } p_0 + \frac{k \cdot 2 s v' \cdot 0.2885 \cdot 0.4343}{T \cdot 10^3 \alpha \cdot \beta \sqrt[3]{v'} \cdot 2.2 \cdot 10^{-5}} \quad (7 \text{ b})$$

p ist also hier von 6 Variablen abhängig. Dies ist jedoch nur scheinbar, da sie nicht alle von einander abhängig sind.

p_0 ist von α unabhängig und wir können setzen:

$$p_0 = F_1(T\beta)$$

Unter Rücksichtnahme auf unsere Bezeichnungen haben wir für verdünnte Lösungen:

$$F_1(T\beta) = e^{\frac{55.56 \beta^3 - a}{55.56 \beta^3 - b}} \quad (10)$$

Hier bezeichnet e den Sättigungsdruck des Dampfes über einer ebenen Wasseroberfläche. a und b sind Konstanten, die für Lösungen von verschiedenen Salzen verschieden sind. Für Chlornatrium gilt $a = 12.4$, $b = 8.6$.¹ Für konzentrierte Lösungen kann man bei praktischer Rechnung zu diesem Ausdruck eine experimentell zu bestimmende Funktion von T und β addieren, die bei Verdünnung gegen 0 geht. Diese Funktion ist für verschiedene Stoffe verschieden und kann hier nicht diskutiert werden.

s ist eine lineare Funktion der Temperatur und der Konzentration. Man kann also setzen:

$$s = s_0 - mT + \frac{n}{\beta^3} = F_2(T \cdot \beta)$$

¹) Für dissoziierte Lösungen wird b mit dem Dissoziationsgrade zu ändern.

$$[s_0 - m 273 = 7.69 \cdot 10^{-2} \text{ gr/cm}]$$

(m und n sind Konstanten).

v' ist eine Funktion der Temperatur und der Konzentration. Die Schwankung mit der Temperatur ist in den für die Meteorologie bedeutungsvollen Intervallen so klein, dass wir sie vernachlässigen wollen. Wir haben also:

$$v' = F_3(\beta) \text{ oder } v'^{2/3} = \varphi(\beta)$$

α ist von den anderen Variablen vollkommen unabhängig. Es tritt in der Formel als ein Parameter auf.

Bei dynamischen Studien, wie sie vielleicht später folgen, ist β eine Funktion von anderen Variablen.

Wir haben also schliesslich

$$\text{Log } p = \text{Log } p_0 + \frac{k \cdot 2 \left(s_0 - mT + \frac{n}{\beta^3} \right) \varphi(\beta) 0.2885 \cdot 0.4343}{T \alpha \beta 2.2 \cdot 10^{-2}} \quad (7 \text{ c})$$

Über die Grenztröpfchen nach der Formel (7 c). — Es ist unschwer zu sehen, dass p mit Variablen β ein Maximum haben muss. Bevor dies Maximum erreicht ist, muss die Kurve eine Gerade, die dem Dampfdrucke in gesättigter Luft entspricht, schneiden, weil eine ebene Wasseroberfläche diese Spannung hat. Bei wachsendem β wird dann also p wieder kleiner und nähert sich asymptotisch dieser Gerade. Daher muss p immer ein Übersättigungsgebiet passieren. Für sehr kleine α^3 , z. B. für $\alpha^3 = 7 \cdot 10^{-6}$, was die untere Grenze dieser Grösse war, wird p beim Maximum bedeutend grösser als der Druck des Wasserdampfes in gesättigter Luft.

Das Maximum für p und den Schnittpunkt mit der Sättigungsgerade kann man durch graphisches Rechnen finden, wenn man p_0 für jedes β kennt. Man erhält dann für jedes α leicht auszunehmende Maxima und Schnittpunkte.

Ich habe für 0° solche Kurven von $\alpha^3 = 2.85 \cdot 10^{-5}$ und von einigen grösseren α^3 gezeichnet. Es zeigte sich nun, dass der Schnittpunkt einer Kurve mit der Sättigungsgerade und daher natürlicherweise das Maximum schon für $\alpha^3 = 2.28 \cdot 10^{-4}$ bei so grossem β stattfanden, dass für diese Punkte die Formel (10) für p_0 gilt. Es ist daher zulässig den ersten Teil der Kurve zu vernachlässigen und den Schnittpunkt und das Maximum rechnerisch zu suchen, wenn man voraussetzt, dass p_0 die Gleichung (10) befriedigt. Ich habe dies für 0° unter folgenden Vereinfachungen gemacht: Vollständige Dissoziation ist überall angenommen, welches hier ohne wesentliche Fehler gemacht werden kann. Ohne dies habe ich eine konstante Kapillaritätskonstante $7.8 \cdot 10^{-2}$ gr/cm angenommen, was auch ohne wesentliche Fehler möglich ist.

Setzt man weiter für $0^\circ p = 4.579$ mm., erhält man eine Gleichung mit den Variablen α und β . Für eine Serie β wird dann α^3 ausgerechnet, und die Gleichung wird graphisch dargestellt. In der Figur 1 werden β als Ordinate und der Briggsche Logarithmus von α^3 als Abscisse aufgezeichnet. Die untere Kurve zeigt also graphisch die Konzentrationen der Grenztröpfchen für verschieden grosse Salzpartikelchen, durch α^3 ausgedrückt.

Um die Maxima zu finden, muss in der Gleichung (7 c) p hinsichtlich β deriviert werden, und der dadurch erhaltene Ausdruck wird gleich 0 gesetzt. Man erhält auch hier eine Gleichung mit den Variablen α und β , immer vorausgesetzt, dass die Temperatur konstant gleich 0° C. ist. Diese Gleichung kann leicht so umgeformt werden, dass

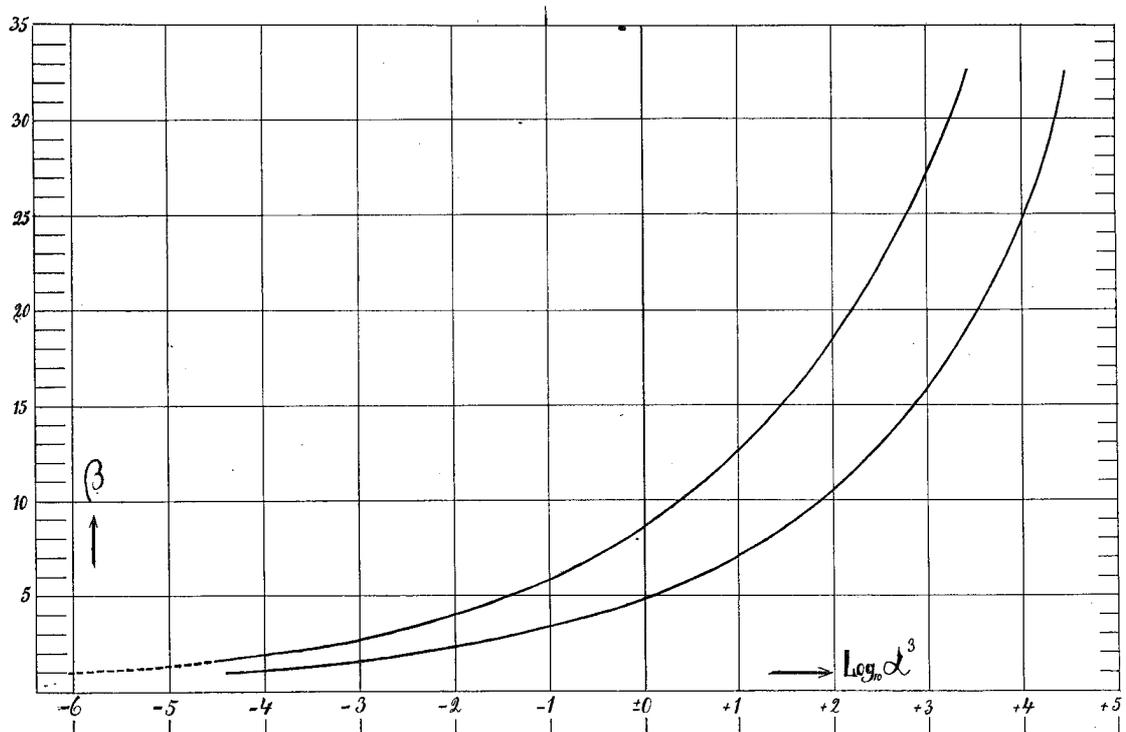


Fig. 1.

β daraus lösbar wird. Hier wird die Gleichung wie die vorige graphisch dargestellt. In der Figur 1 zeigt die obere Kurve diese Gleichung. Für jedes α^3 erhält man hieraus die Konzentration eines Tröpfchens, wenn p das Maximum erreicht hat. Wird eine Gerade parallel der Ordinate aufgetragen, so erhält man für den durch den Schnittpunkt dieser Gerade mit der Abscisse bestimmten α^3 -Wert teils die Konzentration eines auf diesem α^3 entwickelten Grenztröpfchens teils die Konzentration dieses Tröpfchens, da es so lange gewachsen ist, dass p Maximum geworden ist. Darauf ist r aus der Formel (8) leicht zu berechnen. Man kann durch Einsetzen dieser Werte von a und β in die Formel (7 c) auch das maximale p eines wachsenden Tröpfchens berechnen. Dies wird hier nicht getan, teils weil man in dieser Abhandlung keinen Gebrauch davon macht, teils weil dies p nach α^3 gleich ungefähr 10^{-3} praktisch — wenn nicht theoretisch — dem Drucke gesättigter Dampf so nahe ist, dass die Übersättigung ohne Bedeutung ist und nur mit einer im Verhältnis der Übersättigung zu kleinen Genauigkeit angegeben werden kann.

Hieraus folgt, dass die frühere Angabe der unteren Grenze des Grenztröpfchens bedeutend niedriger zu setzen ist. Ich setzte da¹ nur eine ausserordentlich kleine Übersättigung voraus.

Für einige Werte von α^3 , die im zweiten Kapitel dieser Mitteilung von Bedeutung sind, werden die Radien der Grenztröpfchen und der Tröpfchen der maximalen Spannung berechnet. Die erhaltenen Werte werden in der Tabelle 2 wiedergegeben.

¹⁾ Hilding Köhler, Zur Kondensation u. s. w., Erste Mitt. S. 9.

Tabelle 2.

	β^3	r
$\alpha^3 = 2.846 \cdot 10^{-5}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 3.65 \\ 1.03 \cdot 10^{-6} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 2.276 \cdot 10^{-4}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 2.20 \\ 1.75 \cdot 10^{-6} \\ 2.93 \cdot 10^{-6} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.821 \cdot 10^{-3}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 5.7 \\ 4.81 \cdot 10^{-6} \\ 8.19 \cdot 10^{-6} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.457 \cdot 10^{-2}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 15.4 \\ 1.34 \cdot 10^{-5} \\ 2.31 \cdot 10^{-5} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.165 \cdot 10^{-1}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 42.9 \\ 3.76 \cdot 10^{-5} \\ 6.47 \cdot 10^{-5} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 109 \\ 1.03 \cdot 10^{-4} \\ 1.88 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.865 \cdot 10^{+0}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 157 \\ 1.17 \cdot 10^{-4} \\ 2.59 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 3.730 \cdot 10^{+0}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 226 \\ 2.08 \cdot 10^{-4} \\ 3.65 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 7.460 \cdot 10^{+0}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 1225 \\ 3.65 \cdot 10^{-4} \\ 2.92 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.492 \cdot 10^{+1}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 314 \\ 2.92 \cdot 10^{-4} \\ 5.19 \cdot 10^{-4} \\ 4.09 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 2.984 \cdot 10^{+1}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 430 \\ 4.09 \cdot 10^{-4} \\ 7.34 \cdot 10^{-4} \\ 5.79 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 5.967 \cdot 10^{+1}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 610 \\ 5.79 \cdot 10^{-4} \\ 1.03 \cdot 10^{-3} \\ 8.25 \cdot 10^{-4} \end{array} \right)$
$\alpha^3 = 1.19 \cdot 10^{+2}$	$\left\{ \begin{array}{l} p = 4.579 \\ p = \text{Max.} \end{array} \right.$	$\left(\begin{array}{l} 885 \\ 8.25 \cdot 10^{-4} \\ 1.45 \cdot 10^{-3} \\ 1.20 \cdot 10^{-3} \\ 2.10 \cdot 10^{-3} \end{array} \right)$

Die Schwankung der Grenztröpfchen mit der Temperatur. — In der Tabelle 3 werden die Dampfspannungen der ebenen Lösungsoberfläche und die Kapillaritätskonstanten für vier verschiedenen β^3 bei einigen Temperaturen unter 0° C. angegeben.

Tabelle 3.

	$\pm 0^\circ$	-5°	-10°	-15°
$\beta^3 = 1$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 3.78 \\ s = 8.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 2.67 \\ s = 8.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.87 \\ s = 8.8 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.23 \\ s = 8.9 \end{array} \right.$
$\beta^3 = 2.33$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 4.28 \\ s = 8.00 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 2.95 \\ s = 8.1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 2.00 \\ s = 8.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.34 \\ s = 8.3 \end{array} \right.$
$\beta^3 = 4.05$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 4.43 \\ s = 7.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 3.06 \\ s = 7.77 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 2.07 \\ s = 7.84 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.38 \\ s = 7.91 \end{array} \right.$
$\beta^3 = 8.68$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 4.50 \\ s = 7.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 3.11 \\ s = 7.77 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 2.11 \\ s = 7.84 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} p_0 = 1.41 \\ s = 7.91 \end{array} \right.$

Für $\beta^3 = 1$ und 2.33 ist die Dampfspannung aus den Tabellen in Landolt — Börnstein Physikalisch-Chemischen Tabellen extrapoliert. Für höhere β^3 ist sie nach der

Formel (10) berechnet unter Annahme, dass für $\beta^3 = 4.05$ das Salz zu 75 % dissoziiert ist, und dass für $\beta^3 = 8.68$ vollständige Dissoziation vorliegt. Den Kapillaritätskonstanten kann keine grosse Genauigkeit zugeschrieben werden. Wie man aus der Formel sehen kann, spielen sogar Veränderungen in den Einheiten dieser Grösse eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 4.

	α^3	$+ 0^\circ$	$- 5^\circ$	$- 10^\circ$	$- 15^\circ$	r
$\beta^3 = 1$	10^{-3}	p = 4.02	p = 2.84	p = 2.00	p = 1.31	$2.1 \cdot 10^{-6}$
	10^{+3}	p = 3.78	p = 2.67	p = 1.87	p = 1.23	$2.1 \cdot 10^{-4}$
$\beta^3 = 2.33$	10^{-3}	p = 4.46	p = 3.08	p = 2.09	p = 1.41	$2.9 \cdot 10^{-6}$
	10^{+3}	p = 4.28	p = 2.95	p = 2.00	p = 1.34	$2.9 \cdot 10^{-4}$
$\beta^3 = 4.05$	10^{-3}	p = 4.58	p = 3.17	p = 2.15	p = 1.44	$3.5 \cdot 10^{-6}$
	10^{+3}	p = 4.43	p = 3.06	p = 2.07	p = 1.38	$3.5 \cdot 10^{-4}$
$\beta^3 = 8.68$	10^{-3}	p = 4.62	p = 3.20	p = 2.17	p = 1.45	$4.5 \cdot 10^{-6}$
	10^{+3}	p = 4.50	p = 3.11	p = 2.11	p = 1.41	$4.5 \cdot 10^{-4}$

Aus der Formel (7 c) habe ich für $\alpha^3 = 10^{-3}$ und für $\alpha^3 = 10^{+3}$ die Dampfspannung über Tröpfchen von Konzentrationen, die den obenstehenden Werten von β^3 entsprechen, berechnet. Die Ergebnisse für vier Temperaturen unter 0° werden in der Tabelle 4 wiedergegeben.

In dieser Tabelle ist auch der Radius angegeben ohne Rücksicht auf die Veränderung der Dichte der Lösung mit der Temperatur. Ich vernachlässige in dieser Mitteilung überall diese Veränderung.

In Figur 2 habe ich die Dampfspannungskurven von Wasser und Eis für Temperaturen von 0° bis $- 20^\circ$ aufgezeichnet. Diese Kurven sind stark ausgezogen. Für obenstehende α^3 habe ich folgende Dampfspannungskurven aufgezeichnet:

für $\alpha^3 = 10^{-3}$ bei $\beta^3 = 1$, 2.33 und 8.68. Für $\alpha^3 = 10^{+3}$ bei $\beta^3 = 1$, 2.33

Aus der Figur geht zunächst hervor, dass die Dampfspannungskurven der Tröpfchen für $\beta^3 = 1$ und 2.33 nicht parallel derjenigen des Wassers verlaufen. Sie nähern sich sehr langsam und müssen sie schliesslich schneiden. Dies beruht darauf, dass p_0 bei dem Gefrierpunkt der Lösung die Dampfspannungskurve des Eises schneiden muss. Ist die Verdünnung so gross, dass dieser Schnittpunkt 0° sehr nahe liegt, wird die Dampfspannungskurve eines Tröpfchens nahezu derjenigen der ebenen Wasseroberfläche parallel. Somit erhält die Kurve für konzentrierte Tröpfchen eine sowohl translatorische als rotatorische Bewegung bei wachsender β^3 . Zum Anfang ist die Geschwindigkeit dieser Bewegung relativ gross, das heisst nur kleine Wassermengen dürfen kondensiert werden, um eine bedeutende Steigerung der Dampfspannung hervorzurufen. Je kleiner α^3 ist, desto schneller wird diese Bewegung, und für sehr kleine α^3 springt die Spannung sehr schnell bedeutend über die der ebenen Wasseroberfläche. Wir haben früher gesehen (S. 11), dass der Überschreitungspunkt für 0° bei wachsendem α^3 bei immer grösserer Verdünnung eintritt. Wir sehen hier, dass die Dampfspannungskurven der Tröpfchen schon bei $\beta^3 = 4$ nahezu parallel der ebenen Wasseroberfläche werden. Wenn man daneben berücksichtigt, dass r proportional β und nicht β^3 ist, kann man für $\alpha^3 = 10^{-3}$ und grössere α^3 die Grenztröpfchen als von der Temperatur praktisch unabhängig ansehen. Theoretisch ist es natürlich immer von Interesse, die kleine Schwankung zu untersuchen.

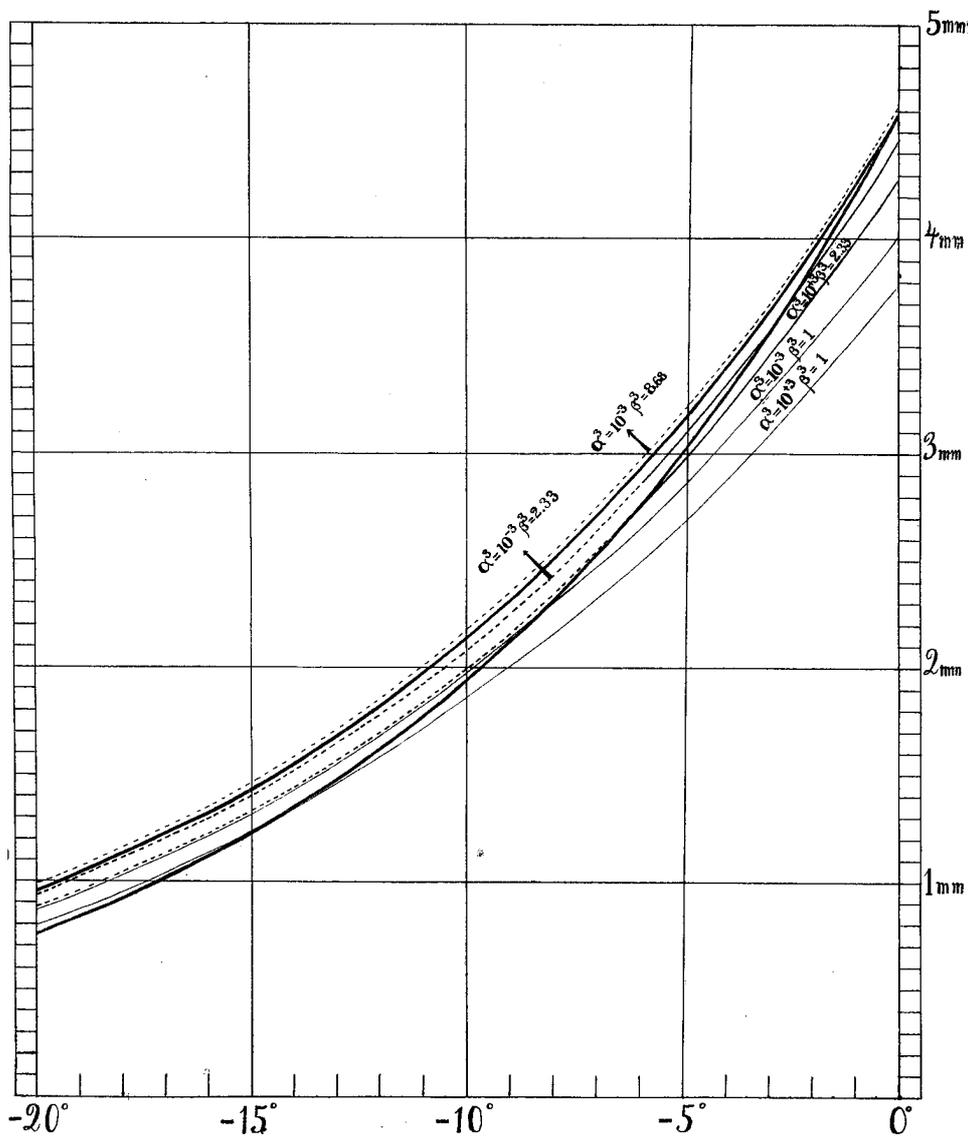


Fig. 2.

Anmerkungen zu verschiedenen α^3 . — Bei grossen α^3 sind die Tröpfchen bei einer bestimmten Konzentration grösser als bei kleinen, und die Temperatur des Schnittpunktes der Dampfspannungskurve des Tröpfchens mit der des Eises niedriger. Dies macht es notwendig, die Verhältnisse für verschiedene α^3 ein wenig näher zu betrachten. Bei einer Feuchtigkeit von 1.6 mm. Hg und einer Temperatur von -12° können die Tröpfchen mit $\alpha^3 = 10^{-3}$ und $\beta^3 = 1$ nicht existieren. Nur Partikelchen mit $\alpha^3 = 10^{-3}$ und derselben Konzentration sind unter diesen Umständen stabil. Tröpfchen mit grösserem α^3 müssen wachsen, die mit kleinerem müssen teilweise verdunsten. Bei Verdunstung vom Wasser wird die Lösung konzentrierter und der Radius nimmt ab. Die Konzentration wächst ausserordentlich viel schneller, als der Radius abnimmt. Der Dampfdruck muss also sinken. Gleichzeitig wird der Luft Wasserdampf zugeführt und die Partikelchen mit $\alpha^3 = 10^{-3}$ müssen wachsen. Man muss schliesslich einen Gleichgewichtszustand erhalten, wo in der Atmosphäre verschieden grosse und verschieden konzentrierte Tröpfchen schweben.

Ist dagegen bei -12° der Dampfdruck 1.7 mm. Hg, können für $\beta^3 = 1$ nur Partikelchen mit $\alpha^3 = 10^{-3}$ im Gleichgewicht sein. Tröpfchen mit grösseren α^3 müssen

wachsen. Wir erhalten auch hier bald einen Gleichgewichtszustand. Für wachsende α^3 wird die Differenz zwischen den Dampfspannungen über Tröpfchen mit verschiedenen α^3 immer kleiner. Wie früher erwiesen müssen Tröpfchen mit kleinen α^3 recht bedeutende Übersättigungsgebiete passieren. Wenn so kleine α^3 gleichzeitig mit grösseren, wo die geforderte Übersättigung praktisch zu vernachlässigen ist, in der Atmosphäre vorhanden sind, ist es unwahrscheinlich, dass die kleinen das Übersättigungsgebiet passieren, ehe die grösseren schon aus der Luft gefallen sind.

Immer gibt es eine kleine Verschiedenheit in der Dampfspannung über Tröpfchen mit verschiedenen α^3 . Aus diesen Tatsachen erhellt, dass eine Ausscheidung von grösseren Partikelchen in der Atmosphäre stattfindet. Man kann in der Tat allmählich Luftmassen mit nahezu gleich grossen α^3 erhalten. Wie gross diese Luftmassen sind, beruht auf verschiedenen Verhältnissen, zuweilen können verschiedene Schichten in einer Wolke verschiedene α^3 enthalten. Durch Zusammenfliessen der Tröpfchen wachsen die α^3 , durch Zerteilung von Tröpfchen werden sie natürlich kleiner.

Die Frostübersättigung. — Eine Lösung, die von $\beta^3 = 2.33$ repräsentiert wird, gefriert unter gewöhnlichen Verhältnissen bei einer Temperatur von ungefähr -6° . Jedes Tröpfchen einer Lösung dieser Konzentration ist bei Temperaturen unter -6° unterkühlt, weshalb die Spannungskurven in der Figur 2 von dieser Temperatur aus gestrichelt sind. Wenn $\alpha^3 = 10^{-3}$ ist, schneidet die Dampfspannungskurve die des Eises bei ungefähr -2.5° . In der Atmosphäre können also zwischen -2.5° und -6° Tröpfchen mit einem Radius von $4.5 \cdot 10^{-6}$ cm. im Gleichgewicht existieren, wenn Frostübersättigung vorhanden ist. So kleine Tröpfchen sind unsichtbar und rufen sicherlich nicht einmal Trübung hervor.

Ist für dieselbe α^3 -Grösse $\beta^3 = 1$, schneidet die Dampfspannungskurve die des Eises bei etwa -8.5° . Eine Lösung von einer Konzentration, die $\beta^3 = 1$ entspricht, gefriert, wie früher erwähnt, bei -21.2° . Zwischen -8.5° und -21.2° können also bei Frostübersättigung Tröpfchen mit einem Radius von $2.1 \cdot 10^{-6}$ im stabilen Gleichgewicht existieren. Lassen wir jetzt β^3 variieren, so sehen wir dass das Gebiet zwischen den Dampfspannungskurven des Eises und denjenigen des Wassers zwischen -21.2° und -2.5° überfahren wird, wenn β^3 von 1 bis 2.33 wächst. Dabei verändert sich der Radius nur von $2.1 \cdot 10^{-6}$ bis $4.5 \cdot 10^{-6}$ cm. Lassen wir jetzt auch α^3 variieren, kann man bis zu -21.2° das ganze Feld zwischen den Dampfspannungskurven für Eis und Wasser ausgefüllt bekommen, ohne dass man Unterkühlung einführen muss. Gestattet man Unterkühlung, was man sicherlich tun kann, kann man weit grössere Tröpfchen in diesem Gebiet erhalten. Wichtig ist hier, dass Kondensation zu fliessendem Wasser beim Vorhandensein von Salz mit Notwendigkeit stattfinden muss. Für die Wolken- und Nebelbildung spielt dann möglicherweise das Zusammenfliessen eine grosse Rolle.

Durch ein einfaches Beispiel ist hier die Möglichkeit der Frostübersättigung erklärt. Diese Übersättigung ist kein seltenes Ereignis auch bei heiterer Luft. In Nebel ist sie im Winter die Regel. Beispiele solcher Übersättigung bei heiterem Wetter habe ich früher gegeben¹. Es war dort von den Raureifablagerungen die Rede. In der Tat setzen sich bei Frostübersättigung bei klarem Wetter immer Ablagerungen ab. Diese bilden eine Sammlung von schönen Kristallen. Die winzigen Tröpfchen, die sich unter solchen Verhältnissen in der Luft befinden können, gefrieren, hinreichend konzentriert, nicht beim Anprallen an Gegenstände, falls sie nicht Wasser in sich aufnehmen. Sind sie unterkühlt, gefrieren sie und bilden dem Aussehen nach amorphe Partien.

¹) *Hilding Köhler*, Studien über die Nebelfrostablagerungen auf den Pärtetjåkko, Naturwissenschaftliche Untersuchungen des Sarekgebirges in Schwedisch Lappland, geleitet von Prof. Axel Hamberg.

Nach meiner Erfahrung ist es bei Frostübersättigung und klarem Wetter immer ruhig, oder es weht nur unbedeutend. Das Zusammenfliessen¹ und dadurch das Wachsen der Tröpfchen zur Sichtbarkeit wird daher nicht sehr lebhaft, kleine Luftströmungen bringen Wolkenpartien zum Vorschein. In den Gebirgen ist es selten vollkommen ruhig. Daher beobachtet man hier oft bei Frostübersättigung, etwa über einem Tal oder einem Gipfel, eine Wolkenbildung. Diese ist nicht immer stabil, sondern entsteht oder verschwindet pulsatorisch. Dies beruht wohl auf Wirbelbildungen in schwachen Luftströmen.

Ich will kurz ein Beispiel davon anführen. In der Nacht zwischen dem ersten und zweiten Januar 1921 bestand auf dem Halde Frostübersättigung bei klarem Wetter. Zwischen 2 a und 3 a den 2. Januar wurde die übersättigte Luftmasse allmählich durch trocknere, aber auch kältere Luft von Westen verdrängt. Bei dieser Verdrängung entstand ein schwacher Luftstrom, und im E, wo das Land niedriger ist, bildeten sich Wolken Schleier, die zuweilen wieder aufgelöst wurden. Nach aller Wahrscheinlichkeit hatte man hier eine Mischung von Luft unter Wirbelbildung. Der Tröpfchenradius war ca. $7 \cdot 10^{-4}$ cm. Die Schleier waren zuweilen so dünn, dass man sie kaum unterscheiden konnte, und die Luft war wie getrübt. Es war also ein kontinuierliches Übergehen der Tröpfchen in sichtbare Grössen. Im Winter sind in Gebirgsgegenden solche ausgeprägten Phänomene relativ selten, was darauf beruht, dass die Umlagerungen oft nicht so ruhig vor sich gehen. Im Sommer dagegen sind sie durchaus nicht ungewöhnlich. Man sieht da oft, wie die Trübung direkt in Wolkenbildungen übergeht.

Es scheint mir, als ob eine solche Beobachtung besser als alle Messungen klar darlegte, dass die Kondensation einen kontinuierlichen Verlauf hat, und dass im Winter bei Gelegenheiten wie den obengenannten Kondensationskerne schon vorhanden sind. Sind sie da, müssen sie von besonderer Art sein, da sich keine Eiskristalle auf ihnen bilden. Ich habe hier dargelegt, dass sie aus einer flüssigen Lösung bestehen können. Eben dies erklärt, dass wir keine Schneekristalle erhalten (oder erhalten können), wenn Frostübersättigung bei klarer Luft besteht.

Durch die Darlegung will ich klarer als in der früheren Mitteilung gezeigt haben, wie es möglich ist, dass Wasserwolken auch weit unter 0° entstehen können. Demnach dürften solche in der MgNa-Zone sehr gewöhnlich sein. Ich gehe jetzt dazu über, einige experimentelle Untersuchungen über die Konstitution der Wolken zu beschreiben. Man wird hier finden, dass in der MgNa-Zone das Vorkommen von Wasserwolken unter 0° die allgemeine Regel ist. Dabei wird auch die Auflösung dieser Wolken in Schnee dargelegt. Im zweiten Kapitel wird schliesslich eine Bestätigung meiner direkten Beobachtungen gegeben.

Methodik der Untersuchung.

Für die Untersuchungen, die hier behandelt werden, ist hauptsächlich das Mikroskop neben rein okulären Beobachtungen angewandt. Meine Einrichtungen sind sehr einfach. Das Mikroskop² war ein altes No. 1667 von Zeiss, Jena.³ Der Photographicapparat

¹) Dass Zusammenfliessen nach einer gewissen Grösse, die hauptsächlich Ursache des Wachsens der Tröpfchen ist, wird im Kapitel II nachgewiesen.

²) Das Mikroskop wurde durch die Vermittelung des Direktors Krogness von Tromsø Museum zu meiner Verfügung gestellt.

³) Die Methodenbeschreibung ist ausführlich, damit junge Wissenschaftler sehen, wie einfach und billig solche Untersuchungen ausgeführt werden können.

war ein Ica, Typus Hecla mit Novar-Anastigmatischer Linse. Er wurde von einem eisernen Stativ, wie man sie meist in den chemischen Laboratorien findet, über dem Mikroskope gehalten. Über die Linsenhülse des Photographieapparats wurde ein Messingrohr von etwa 3 cm. Länge befestigt. Über das obere Ende des Mikroskops und über dieses Rohr wurde ein dichtes Rohr von Samt gezogen. Durch Einnähen von Kautschukschläuchen an den Enden des Samtrohres wurde eine für von aussen kommenden Licht undurchdringliche Verbindung zwischen Photographieapparat und Mikroskop geschaffen. Der Photographieapparat war auf unendlich, und das Bild der Visierscheibe durch Verschiebungen des Mikroskopobjektivs auf grösste Deutlichkeit eingestellt. Die

Vergrosserung auf der Scheibe betrug 30 linear. — Für die Aufstellungweise ich übrigens auf Figur 3 hin.

Mikroaufnahmen in diesen Gegenden können im allgemeinen der Stürme wegen nicht im Freien genommen werden. Bei Nebel ist es am öftesten vollkommen unmöglich im Freien zu sein, da man über 0° Wasserbeschlüge, unter 0° Eisbeschlüge erhält. Ich war daher genötigt, das Photographieren im Hause auszuführen, was bei Mikroaufnahmen von Eisbildungen nicht leicht war. Der Platz muss so gewählt sein, dass sowohl die Temperatur als die Feuchtigkeit nicht viel von denjenigen draussen abweichen. Ich wählte auf dem Halde ein halb unterirdisches Zimmer ohne Fenster, nur mit einer Dachöffnung, wodurch Schnee einwirbelte. Als Lichtquelle wurde eine elektrische Lampe von mittlerer Lichtstärke gebraucht. Hier konnte ich bei jeder Temperatur und zu jeder Zeit Aufnahmen erhalten. Während der dunklen Zeit sind die meisten der hier publizierten Aufnahmen

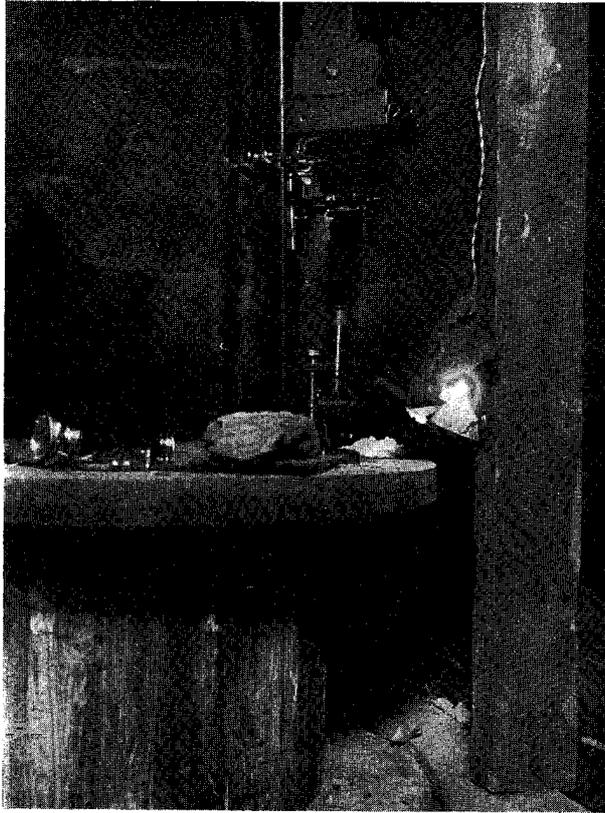


Fig. 3.

gemacht werden. Die Expositionszeit schwankte zwischen 3 und 6 Minuten.

Der Apparat stand in diesem Zimmer unberührt. Dadurch hatte er immer die Temperatur des Zimmers und konnte bei jeder passenden Gelegenheit augenblicklich in Gebrauch genommen werden. Dies ist eine notwendige Bedingung, wenn man bei solchen Untersuchungen allseitige gute Ergebnisse erhalten will.

Der Schnee wurde auf eine, aus einer reingewaschenen photographischen Platte geschnittenen Glasscheibe aufgesammelt. Die Grösse der Scheibe war 6×9 cm.² Diese Platte wurde möglichst niemals mit den Händen berührt, sondern mit einer hölzernen Klemme gehalten und mit derselben Klemme unter dem Objektiv des Mikroskops befestigt. Diese Vorsichtsmassregeln sind notwendig, um Schmelzung und Verdunstung zu vermeiden. Bei den sehr kleinen Gegenständen, die ich untersuchte, war es jedoch zuweilen der Lichtwärme wegen schwer dies zu vermeiden, obgleich sehr schwaches Licht und empfindliche Platten angewandt wurden. Nachdem möglichst viele Schneebildungen untersucht, und die mir interessanten Bildungen photographiert waren, wurde die

Platte mit einem weichen Pinsel sorgfältig von Schnee gereinigt. Dies war notwendig um zu vermeiden, dass man bei anderen Gelegenheiten unter anderen Verhältnissen etwa dieselben Bildungen bekäme.

Ausser Schnee habe ich Nebelfrost sehr eingehend untersucht. Schon *Assmann* hat Nebelfrostbildungen mikroskopisch aufgenommen. Er nahm, soweit seine Mitteilungen ersehen lassen, diese Ablagerungen zeitweise von Gegenständen im Freien. Schon 1915 versuchte ich die Methode ebenfalls, aber musste sie verwerfen, da es vollkommen unmöglich ist, wahrheitsgetreue Aufnahmen zu erhalten. Es entstehen nämlich wegen der mechanischen Eingriffen, die man dabei machen muss, eigentümliche Schmelzphänomene. Dazu kommt, dass man die feinsten Bildungen leicht zerstört und nicht die ganze Ablagerung erhalten kann. Auch hier habe ich freilich, nachdem andere Methoden mich mit den Bildungen mikroskopisch vertraut gemacht hatten, und ich die zerstörten Bildungen objektiv beurteilen konnte, dies Verfahren gebraucht, i. e. wenn ich wissen wollte, in welchem Grade ich die Ablagerungen als von Wolkenpartikelchen gebildet betrachten konnte. Dies war nämlich für die Beurteilung meiner Analyse notwendig. Ich glaube jedoch, dass es ein wenig schwierig ist, nach diesem Verfahren direkt zu beurteilen, wie der Nebelfrost sich bildet, wenigstens so, dass man Beweise für seine Bildung aus Tröpfchen davon sehen kann.

Es ist natürlich zu erwarten, dass man in nebliger Luft beim Exponieren eines sehr dünnen Drahtes

im Diameter etwa von der Grössenordnung der Kondensationskerne — oder wenn dies unmöglich ist, von derjenigen der Nebeltröpfchen —, wirklich finden kann, ob Tröpfchen sich ablagern oder ob es Sublimation von Dampf ist. Leider hatte ich vorläufig keinen Draht zur Verfügung, der einen Diameter unter $7 \cdot 10^{-8}$ cm. hatte.¹

Die winzigen Mengen, die sich auf einen solchen Draht beim kurzen Exponieren in der Luft absetzen, schmelzen und verdunsten natürlicherweise sehr leicht. Es ist darum notwendig, ihn vorsichtig zu behandeln. Er wurde zwischen zwei Kupferstäbchen gespannt. Diese Stäbchen wurden mittelst Schwefel in einem Messingsrohr befestigt. Das Rohr hatte eine Form, die aus Fig. 3 hervorgeht, so dass die ganze Einrichtung unter das Mikroskop gesetzt, und dann die Ablagerung photographiert werden konnte. Man konnte diese Einrichtung, ohne den Draht durch Körperwärme zu beeinflussen, beim Fassen rings um den horizontalen Rohrteil, mit den Händen transportieren und auch in der Luft exponieren. Unter dem Mikroskop war der Draht frei in der Luft gespannt und also nicht von etwaiger Erwärmung des Mikroskops abhängig. Dies Verfahren erwies sich als sehr gut. Nur bei zwei oder drei Gelegenheiten sah ich die winzigen Bildungen zusammenschmelzen, und dies traf bei Temperaturen in der Nähe von 0° ein.

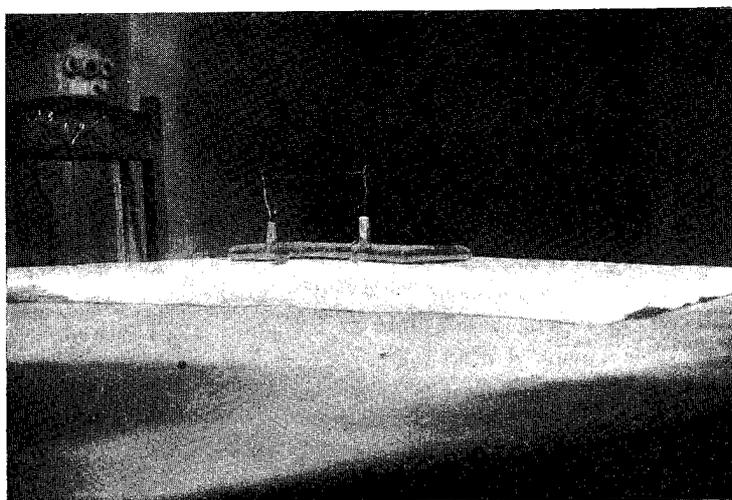


Fig. 4.

¹) Jetzt habe ich Drähte mit einem Diameter bis zu $1.5 \cdot 10^{-8}$ cm. erhalten.

Das Ziel der Untersuchung. — Das Ziel der Beobachtungen ist, eine längere Serie systematischer Untersuchungen über die Konstitution der Wolken unter 0° auszuführen. Weiter wollte ich den Mechanismus der Schneebildung suchen.

Es ist ja, wie ich schon in meiner vorigen Mitteilung hervorhebe, seit lang bekannt, dass Wolken aus Wassertröpfchen weit unter 0° bestehen können. Systematische Untersuchungen sind, so viel ich weiss, nicht darüber ausgeführt. Seitdem *Assmann* und *Dobrowolski* ihre Untersuchungen über Nebelfrost ausführten, kenne ich keine eingehenden mikroskopischen Studien, die zu einer Kenntnis der Wolkenkonstitution führen können. Durch vereinzelte optische Beobachtungen hat man später dann und wann Wassertröpfchen auch bei sehr niedriger Temperatur in den Wolken gefunden.

Alle kürzlich erschienenen Arbeiten verweisen, wo es autoritative Beurteilung von Wolkenablagerungen gilt, auf die kleine Abhandlung von *Assmann* in *Met. Zeitschr.* von 1889. Diese Abhandlung enthält eine Reihe von interessanten Beobachtungen, die der Anzahl nach aber sehr unbedeutend sind, und *Assmann* selbst zog nur vorläufige Schlüsse daraus. Es liegt jedoch ausserordentlich nahe, alle solche Ablagerungen als aus Tröpfchen gebildet anzusehen. Selbst war ich vollkommen davon überzeugt, aber konnte es nicht als bewiesen ansehen. Es war auch kaum berechtigt, das Vorhandensein von Nebelfrost (Rauhrost und Rauheis) als Beweis für die Existenz der Wassertröpfchen unter 0° anders hervorzuheben als in Form einer freilich ausserordentlich wahrscheinlichen Hypothese. *A. Wegener*¹ hebt mit Schärfe hervor, dass die Sublimation bei Frostübersättigung sehr lebhaft sein muss, und dass Nebelfrost auch durch Sublimation gebildet werden kann. Eben dadurch ist es unmöglich zu entscheiden, ob Wassertröpfchen überhaupt immer an seiner Bildung teilnehmen oder dazu notwendig sind. Um hierüber Gewissheit zu erlangen, wäre eine weitgehende systematische Untersuchungsreihe notwendig. Auf eine solche Untersuchung zielte ich. Dabei müsste man die Lösung zweier Probleme finden: eine Feststellung der Konstitution der Wolken, und die Bildungsart der gewaltigen Eisablagerungen auf den Gebirgen.

Andere haben eine sehr bewunderungswürdige Arbeit über die Formen der Schneekristalle ausgeführt, und eine grosse Anzahl ausgezeichnete photographische Aufnahmen von den schönsten Kristallen sind veröffentlicht. Ich suchte nicht die ausgebildeten Formen, sondern die Übergangsformen und die Anomalien. Hierdurch glaubte ich die Bildungsart des Schnees zu finden.

In *Hann-Sürings* Lehrbuch der Meteorologie findet man folgende Erklärung: »Ist die Luft in bezug auf Eis gerade gesättigt oder wenig übersättigt, so bilden sich Vollkristalle, deren Anwesenheit sich durch Erscheinungen vom Halo zu erkennen gibt. Bei stärkerer Übersättigung in bezug auf Eis tritt weitere Kondensation an den Ecken des Vollkristalls ein, es bilden sich Schneesterne, Schneekristalle. Schreitet die Übersättigung weiter fort, so dass die Luft auch in bezug auf unterkühltes Wasser gesättigt ist, so wird die Verzweigung der Schneesterne immer intensiver, so dass Reifgraupeln (Sphärokristalle) entstehen.« Wir haben also hier drei Typen, die bei verschieden hoher Übersättigung in Bezug auf Eis gebildet werden.

1. Vollkristalle, bilden sich bei Frostsättigung.
2. Sterne, bilden sich bei Frostübersättigung.
3. Reifgraupeln, bilden sich bei Sättigung in Bezug auf unterkühltes Wasser.

Man findet weiter: »Geht die Übersättigung auch noch über dieses Stadium hinaus, so bilden sich neben den jetzt schnell wachsenden Graupeln auch noch unterkühlte Wassertröpfchen. Damit ist die Möglichkeit der Anlagerung solcher unterkühlten Tröpfchen an die Graupel gegeben«.

¹) Thermodynamik der Atmosphäre.

Diese Erklärung des Entwicklungsprozesses lautet sehr wahrscheinlich, kann aber nach meiner früheren Entwicklungen kaum richtig sein und ist auch nicht hinreichend physikalisch begründet. Dem letzten Citate nach sind die Verfasser der Meinung, dass die Übersättigung auch nach der Bildung von Eis fortsetzt. *Hann-Süring* folgen in ihrer Darlegung *Alfred Wegener* in seiner Thermodynamik der Atmosphäre. Ihre Erklärung wird jedoch erst durch einen Satz von Wegener 1920¹ verständlich. Er sagt hier: »Nun wird die relative Feuchtigkeit bei negativen Temperaturen konventionell auf unterkühltes Wasser, nicht auf Eis bezogen. Dies entspricht dem noch zu erläuternden Umstande, dass die zuerst beginnende Eiskondensation in der Atmosphäre einen mehr sporadischen Charakter trägt, oft auch ganz ausbleibt, wenn die Kerne fehlen, während die Kondensation in unterkühlten Tröpfchen eine Massenkondensation darstellt, welche das Auftreten wesentlicher Übersättigung nicht mehr gestattet.« Es wird hierdurch erklärlich, dass bei fortgesetzter Abkühlung der Luft mit Eis die Übersättigung gesteigert werden kann. Indessen ist es nicht klar, warum die Schneekristalle sich nur sporadisch bilden, warum sich das Wasser dagegen in Massen bildet, und warum Übersättigung hier nicht notwendig ist. Wegener sagt auch, dass dies zu erforschen sei. Durch meine früheren Darlegungen ist dies klargelegt. Das Ziel meiner hier zu erwähnenden Untersuchungen war, in einer anderen Weise direkt nachzuweisen, wie die Schneebildung vor sich geht und ein exakt wissenschaftliches Bild davon durch Beobachtungen zu verschaffen. Ich erhielt dadurch auch einen Beweis für die allgemeine Existenz der unterkühlten Wassertröpfchen in den Wolken unter 0°, und kann diese durch photographische Aufnahme der wissenschaftlichen Welt vorlegen.

Untersuchungen über die Existenz der Wassertröpfchen unter 0°. — Schon früher² hatte ich beobachtet, dass Schneekristalle, die bei Nebel unter 0° herunterfielen, oft mit Bildungen besetzt wurden, die sehr an Nebelfrost erinnerten. Diese Bildungen wurden jetzt einer eingehenden Untersuchung unterworfen. Es zeigte sich bald, wie erwartet, dass Tröpfchen sich an den Kristallen abgesetzt hatten. Wird die Ablagerung sehr bedeutend, können die verschiedenen Tröpfchen nicht beobachtet werden. Die Kristalle sehen im Mikroskop wie unförmliche Bildungen zusammengekitteter Eisklumpchen aus, deren Tiefe so gross ist, dass gute Aufnahmen davon unmöglich zu erhalten sind. Fig. 5 zeigt eine solche Bildung. Haben sich nur einige Tröpfchen abgesetzt, kann man dagegen ausserordentlich schöne Aufnahmen erhalten. Fig. 1—3 der Tafel stellen mit solchen Tröpfchen besetzte Kristallpartikel dar. Fig. 1 zeigt besonders deutlich, dass Tröpfchen wirklich vorhanden sind.

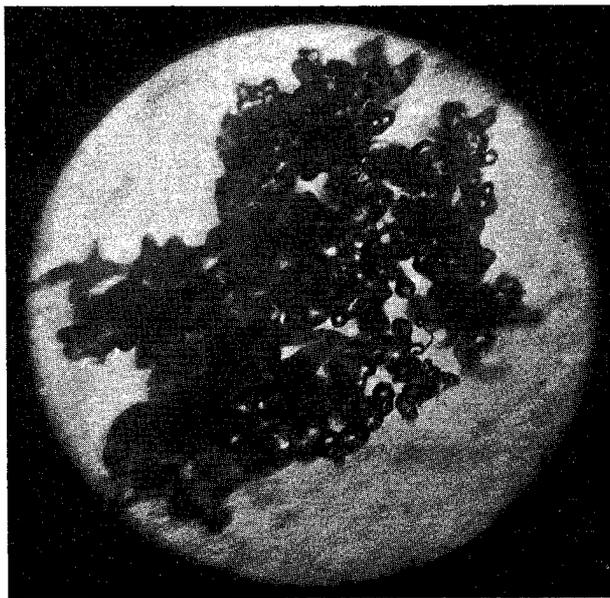


Fig. 5.

Trifft das Kristall in der Wolke auf sehr viele Tröpfchen, fällt es wie gesagt als ein unförmliches Eisklumpchen zu Boden. Zwischen diesen Bildungen und Kristallen

¹) Met. Z. Hefte 1/2 1920 S. 9.

²) *Hilding Köhler*, Studien über Nebelfrost u. s. w. I. c.

mit wenigen Tröpfchen gibt's natürlich Übergangsformen. Fig. 4, 5 der Tafel zeigen solche Übergangsformen. Man sieht hier recht deutlich, wie die Ablagerung der Tröpfchen teilweise Schmelzung des Kristalls hervorgerufen hat. Die Kristallstruktur wird sogar oft, wie die Fig. 4 der Tafel zeigt, dermassen zerstört, dass ganz neue Kristallbildungen teilweise auszuwachsen anfangen. Wenn die kleinen Tröpfchen gefrieren, geben sie Wärme ab, wodurch deutlicher Weise die Temperatur des Kristalls zum Schmelzpunkt erhöht werden kann. Eventuell vorkommendes Salz trägt zur Schmelzung bei.

Tröpfchenbesetzte Kristalle habe ich immer in Nebelfrostablagernden Wolken gefunden. Die Tröpfchengrößen, die ich durch optische Messungen gefunden habe (siehe Kap. 2), sind immer von derselben Ordnung, wie die auf den Kristallen abgelagerten. Es unterliegt also keinem Zweifel, dass unterkühlte Tröpfchen die Wolken bilden, wenn Nebelfrost abgelagert wird.

Der Nebelfrost wurde immer gleichzeitig studiert. Eine Menge von Mikroaufnahmen habe ich im Laufe der Zeit gesammelt. Meine Absicht ist nicht diese alle hier eingehend zu behandeln. Nur in der Masse, wie die Ablagerung eine Bedeutung für das Studium der Wolken hat, werden einige Angaben veröffentlicht.

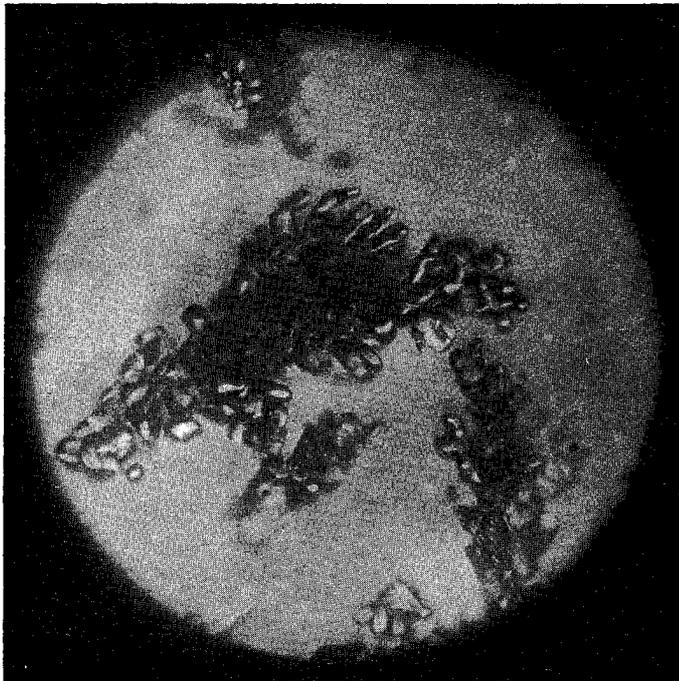


Fig. 6.

abgelagert werden, sind überhaupt leicht zu studieren. Man findet, dass der Nebelfrost mit Kristallen vermischt ist. Fig. 6 und 7 zeigen solche Kristalle. Bei derartigen Gelegenheiten besteht der Nebelfrost also nicht nur aus gefrorenen Tröpfchen. Die Bildungen wie Fig. 6 und 7 der Tafel sind dagegen schwerer im Detail zu studieren. Ich habe sehr eingehend grosse Massen von solchen Ablagerungen mikroskopisch untersucht und nur selten Kristalle gefunden. Es stellte sich nur allmählich heraus, dass kristallinische Bildungen wirklich nicht selten in Massenablagerungen vorkommen, und dass sie in der Tat zwischen Bildungen sitzen, die dem Aussehen nach amorph sind. Fig. 8 zeigt solche

¹⁾ Der natürliche Durchmesser der Ablagerung 6 ist $\frac{1}{8}$ mm. Auf der Leeseite sieht man Kristallbildungen. Hervorzuheben ist, dass man immer auf der Leeseite Kristalle findet. Die mikroskopischen Beobachtungen haben meine früheren (l. c.) Beobachtungen darüber vollständig bestätigt. (Fig. 11). Ich sah einmal in der Nähe von 0° , während eine Menge von Rauheis — wasserklares Eis — in Luv gebildet wurde, wie sich 2 cm. lange wohl ausgebildete weisse Kristalle in Lee absetzen.

Kristalle. Obleich Tröpfchen bei Nebelfrostablagerungen wahrscheinlich immer vorhanden sind, kann man nicht beurteilen, in welchem Grade diese Bildungen aus Tröpfchen bestehen. Es ist anderseits nicht sicher, dass die beobachteten Kristalle nur durch Sublimation gebildet sind. Es ist viel mehr natürlich anzunehmen, dass die Tröpfchen beim Gefrieren eine kristallinische Anordnung der Moleküle erhalten und allmählich auch eine äussere Kristallform annehmen. Im Inneren einer sehr gewaltigen Raufrostablagerung habe ich in der Tat beobachtet, wie eine Kristallisation, das heisst ein Übergehen des Eises aus »amorpher« in kristallinische Form, in grosser Skala vorging.¹ Solche Kristallisation findet wahr-

scheinlich auch während der Anlagerung statt. Nach dem, was ich bis jetzt beobachtet habe, erfolgt diese Umbildung langsam. Ein anderer Grund dazu, dass ein in Nebelfrost gefundenes Kristall nicht notwendig auf Sublimation beruht, ist, dass Eiskristalle aus der Luft oft in die Nebelfrostmasse eingekittet werden. Die Fig. 9 zeigt ein festgekittetes Kristall, das durch Schmelzung sehr unförmlich geworden ist.

Diese Schmelzungsphänomene erklären unmittelbar, warum man, auch wenn eine sehr leb-

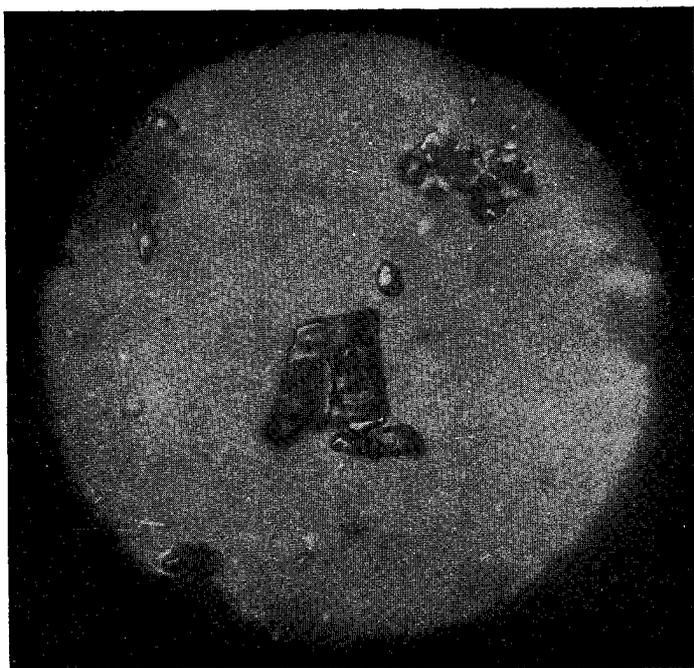


Fig. 8.

¹) Siehe Note 2 S. 51.

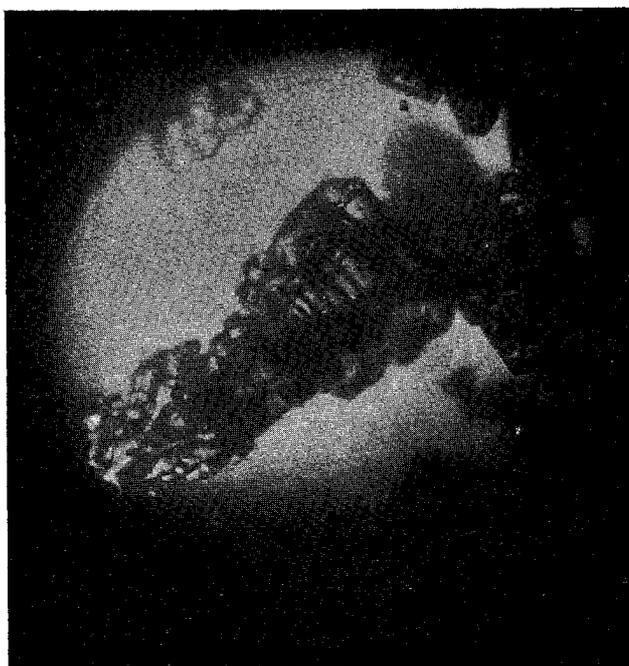


Fig. 7.

hafte Sublimation stattfindet, in Bildungen, die sehr fest sind, nur selten Kristalle antreffen kann. In Betracht davon, dass diese Bildungen dem Aussehen nach amorph sind, kann man anderseits annehmen, dass die Tröpfchenanlagerung bei diesen sehr lebhaft gewesen ist. Je stärker der Wind ist, desto mehr Tröpfchen müssen in der Zeiteinheit einen Gegenstand treffen und dort gefrieren. Wir haben früher gesehen, dass Tröpfchen in den Wolken bei Nebelfrostablagerung vorhanden sind. Ich habe sie auch in einer anderen Weise konstatiert, die direkt zeigt, dass diese kompakten, in Detail schwer zu studierenden Bildungen hauptsächlich aus Tröpf-

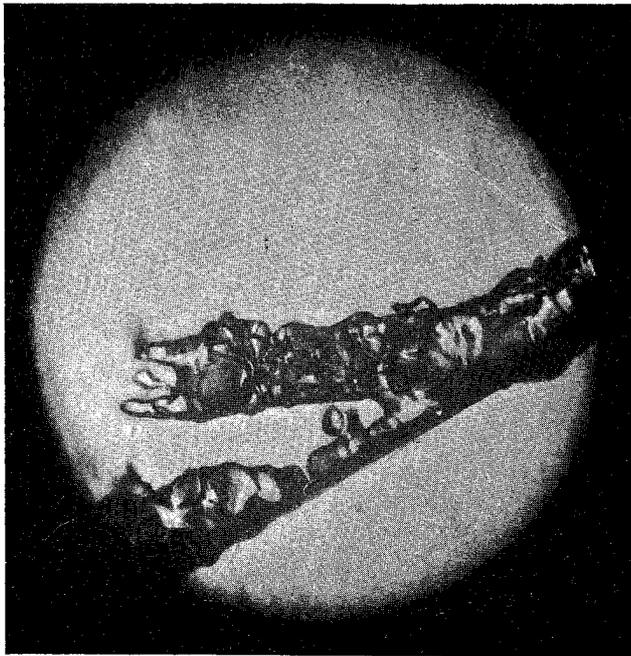


Fig. 9.

und Rauheis) kann nicht stattfinden, ohne dass gleichzeitig Wassertröpfchen nachgewiesen werden können. Auf dem Haldde habe ich noch nicht Gelegenheit gehabt Nebelfrost unter -20° zu sehen. Früher² habe ich indessen gezeigt, dass Nebelfrost bis zu -28° sich ablagert. Ich halte es daher als vollkommen berechtigt jetzt zu behaupten, dass das Vorhandensein von Tröpfchen in den Wolken wenigstens bis zu dieser Temperatur und bis zu einer bestimmten Grenze zur Regel gehört. Auf dem Haldde sind sie bis zu -20° immer direkt in den Wolken nachgewiesen worden. Die Grenze ihres Vorkommens wird durch die Schneebildung gesetzt.

Über die Bildung des Schnees. — Nach dem Obenstehenden befinden sich fast immer Schneesterne in den Wolken, wo Wassertröpfchen existieren. Es ist von Bedeutung zu sehen, wie die oben erwähnten For-

chen gebildet werden. Wenn der Draht¹ eine sehr kurze Zeit exponiert wird, kann man die vereinzelt Tröpfchen im Mikroskope sehen (Fig. 10 der Tafel). Es ist nicht unglaublich, dass die Temperaturerhöhung beim Gefrieren der Tröpfchen hinreichend gross ist, um lebhaftere Sublimation zu verhindern. — Bei starken Winden, wenn die Anzahl der Tröpfchen sehr klein ist, das heisst, nach der Auflösung der Wolke, bilden sich wohl ausgebildete Kristalle (Fig. 10).

Aus dieser gedrängten Darlegung kann unmittelbar geschlossen werden, dass die Nebelfrostablagerung einen indirekten Beweis von dem gleichzeitigen Vorkommen von Wassertröpfchen in den Wolken liefert. Die Bildung von Nebelfrost (Rauh frost

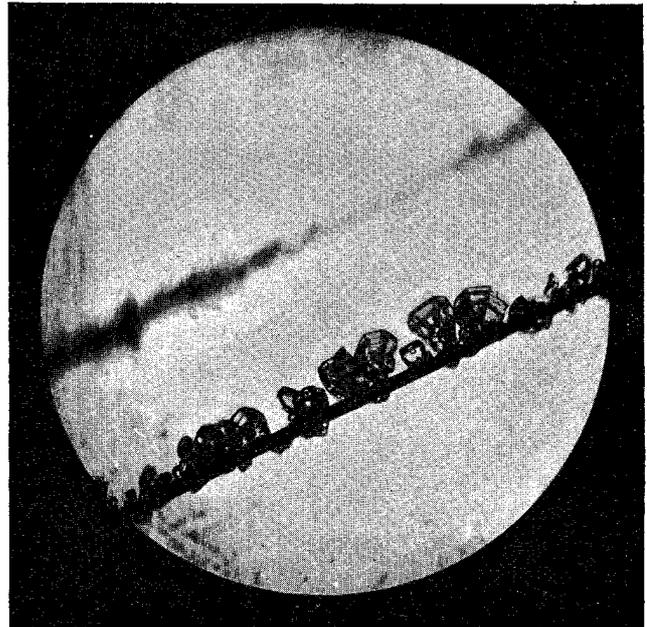


Fig. 10.

¹) Obgleich dieser Umstand für den Beweis der allgemeinen Existenz der Tröpfchen in Wolken mit dem Vorkommen der Tröpfchen an Kristallen gleichwertig ist, habe ich ihm doch hier einen niedrigeren Wert beigelegt, weil es mir noch unmöglich gewesen ist, ebenso deutliche Mikroaufnahmen von Tröpfchen an dem Drahte wie an den Kristallen zu erhalten. Man kann jedoch recht gut sehen, wie sowohl einzelne Tröpfchen als zusammengeflossene vorhanden sind.

²) *Hilding Köhler*, Studien über Nebelfrost u. s. w. l. c.

men auf einander folgen. Ich will erst einen Idealfall, wie er zuweilen vorkommt, beschreiben.

Eine Wolke bildet sich rings um das Observatorium unter 0° bei ruhigem Wetter. Rauhrost setzt sich ab. Es beginnt zu schneien. Zunächst fallen nur einzelne, schön ausgebildete Sterne. Nach einer Weile werden die Sterne etwas zahlreicher, und Tröpfchen beginnen an ihrer Oberfläche aufzutreten. Die Tröpfchen werden immer zahlreicher, und man beobachtet schliesslich die erwähnten Eisklümpchen. Der kristallinische Keim ist jedoch mit blossen Augen leicht sichtbar. Neben diesen tröpfchenbesetzten Kristallen, die wahrscheinlich oft als Graupeln betrachtet werden können, tritt indessen bald eine andere Bildung auf, die von Aussehen tröpfchenbesetzten Kristallen sehr gleich ist. Sie erweist sich jedoch beim näheren Studium als eine ganz andere Bildung. Der kristallinische Keim ist nicht zu sehen. [Ihre Bildungsart muss daher eine andere sein]. Sie besteht in der Tat aus zuweilen recht wenigen zusammengekitteten und gefrorenen Tröpfchen, von denen kristallinische Bildungen ausgewachsen sind. Die Fig. 8 u. 9 der Tafel zeigen einige solche Bildungen. Je mehr die Kristalle entwickelt sind, desto schwieriger wird die Ent-

deckung der verschiedenen Tröpfchen. Es scheint mir, als ob die gefrorenen Tröpfchen allmählich in die Kristallstruktur eingehen. Wie früher bemerkt, geht dies relativ langsam. Indessen kann man beobachten, wie die aus den Tröpfchen entstandenen amorphen Bildungen zuweilen kontinuierlich in die Erhöhungen und den Rücken des Kristalls übergehen.

Es kommt vor, dass man bei bestimmten Gelegenheiten eine Art ausserordentlich schön ausgebildeter Kristalle sehen kann, die deutlich einen Tröpfchenkeim zeigen. Diese Kristalle (richtiger Kristallkomplexe) haben nicht die gewöhnliche Sternform, sondern sind nach allen Richtungen im Raume gleich gut ausgebildet. Von einem Tröpfchenkern wachsen kleine Eislanzen nach allen

Richtungen aus. Diese Eislanzen sind vollkommen den Bildungen gleich, die an Nebelfrosttagen in der Lee von Gegenständen abgelagert werden. (Siehe Fig. 11).

Nachdem der Schnee eine Zeit lang gefallen ist, hört die Bildung von Rauhrost, der sich während des bisherigen Schneefalles an allen Gegenständen abgesetzt hat, auf, und man erhält auf dem Draht wohl ausgebildete Kristalle. Die Tröpfchen sind fast verschwunden. Fig. 9 gibt ein Beispiel der kristallinischen Ablagerung.

Diese Tatsachen sind der Ausgangspunkt des Folgenden.

In einer Wolke, die aus unterkühlten Wassertröpfchen besteht, ist die Luft hinsichtlich Eisdampf übersättigt. Wir haben also hier Frostübersättigung. Ein Eispartikelchen, das sich in einer derartigen Wolke befindet, muss wachsen. Die Geschwindigkeit, mit welcher es wächst, ist umso grösser, je grösser die Frostübersättigung ist. Ein Partikelchen, das in der Luft ruht, das heisst, keine oder nur geringe Bewegung relativ den umgebenden Luftpartikelchen hat, wird von einem sogenannten Hof umgeben, wo die Luft an Wasserdampf ärmer ist. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist hier nicht direkt der

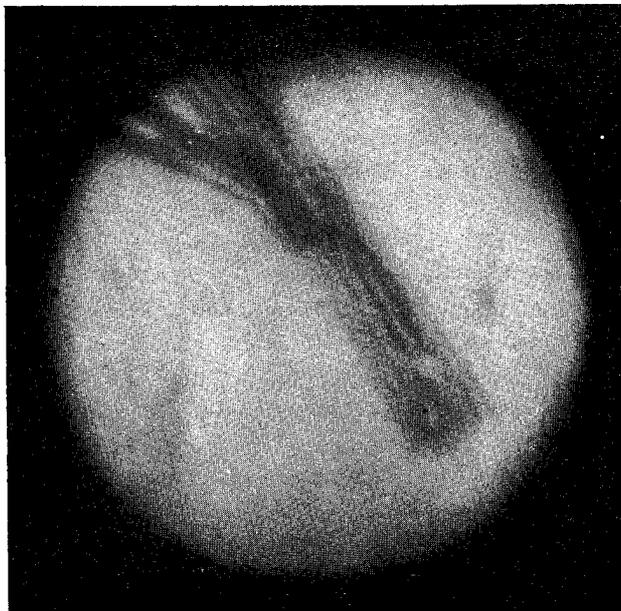


Fig. 11.

Übersättigung proportional, wie man vielleicht erwarten könnte. Die Diffusionsgeschwindigkeit muss eine grosse Rolle spielen. Das Kristall wächst in diesem Falle verhältnismässig langsam. Nachdem es so gross geworden, dass es mit bedeutender Geschwindigkeit zu fallen anfängt, wird die Wachstumsgeschwindigkeit grösser und zwar mit steigender Fallgeschwindigkeit. Die Kristalle, welche zuerst fielen, waren schön ausgebildete Sterne. Diesen Sternen folgten andere mit Tröpfchen besetzt. Die zuerst erschienenen Kristalle waren relativ niedrig gebildet, die später gefallenen relativ hoch. Es ist natürlich, dass je weiter der Fallweg ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Kristall auf Tröpfchen treffen wird. In beiden Fällen waren die Sterne schön ausgebildet, ohne andere Missbildungen als festgekittete gefrorene Tröpfchen.

A. Wegener¹ hat die Theorie aufgestellt, dass unter den hier erwähnten Verhältnissen sich sogenannte Sphäroliten bilden sollten. Ich habe recht grosse Anstrengungen gemacht um solche Kristalle zu finden, aber immer vergebens. Es ist natürlich unmöglich zu verneinen, dass Sphäroliten aus Eis entstehen können. Indessen bilden sie sich in Wolken mit Wassertröpfchen sicherlich nicht unter gewöhnlichen Verhältnissen. Hier sieht man nur die von mir erwähnten Bildungen. Die Wachstumsgeschwindigkeit kleiner Kristalle ist nach obenstehender Darlegung nicht hinreichend gross, um Sphäroliten zu bilden.

Die erste Bildung von Schneekristallen ist nicht schwer zu verstehen. Die Tröpfchen können nur bis zu einer gewissen Grösse in unterkühltem Zustande existieren. Wird diese Grösse durch Kondensation oder — was vielleicht das Allgemeinste ist — durch Zusammenfliessen² erreicht, gefrieren sie. Da die Tröpfchen, welche auf grösseren α^3 gewachsen sind, diese Grösse erst erreichen, tritt keine augenblickliche Kristallbildung in der ganzen Wolke ein, sondern sie findet allmählich statt. Daneben kann man annehmen, dass andere nicht in Wasser lösliche Kerne vorkommen. Auf diesen kondensiert sich der Dampf direkt als Eis. Solche Kerne habe ich gefunden.³ Es bilden sich in beiden Fällen zerstreute Eiskristalle. Ihre Anzahl ist anfangs nicht sehr gross und kann keinen sehr dichten Schneefall hervorrufen. Der sporadische Charakter der Eiskondensation in der Atmosphäre wird hierdurch tatsächlich erklärt. Je grössere Mengen von den Tröpfchen die Gefriergrösse erreichen, desto dichter wird der Schneefall. Schliesslich kommen die oben erwähnten zusammengeflossenen und gefrorenen Tröpfchen, von denen Kristalle auswachsen, und diese Tröpfchen sind von sehr verschiedenen Grössen. Es ist also jetzt klar, dass die unterkühlten Tröpfchen auch vor dem Erreichen einer bestimmten Grösse in der freien Atmosphäre gefrieren und als Kondensationskerne für Eis auftreten können.

Es bleibt noch zurück zu untersuchen, welche Umstände dies Zusammenprallen und Gefrieren hervorrufen. Aus der Darlegung sieht man, dass das Zusammenprallen das Gefrieren verursacht. Das Zusammenprallen der Tröpfchen ist eine Tatsache auch für relativ kleine Tröpfchen. Wie wird es hervorgerufen? Vieles spricht dafür, dass die Turbulenz der Luft beim Zusammenprallen wirksam ist. Wenn die Kristalle durch die Luft fallen, bilden sich eben kleine Wirbel auf ihrer Bahn. In Betracht davon, dass die Kristalle im Verhältnis zu den Tröpfchen ausserordentlich gross sind, ist es sehr wohl denkbar, dass die Energie dieser Wirbel ausreicht, um eine lebhaftere Bewegung der Tröpfchen hervorzurufen und ein heftiges Zusammenprallen zu bewirken. Dass das Zusammenprallen in kleinen Wirbeln wahrscheinlich ist, davon kann man sich durch einfache Versuche

¹) A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre. Leipzig 1911 S. 90 u. 286.

²) Siehe Kap. 2 S. 44.

³) Sie bestehen aus Pollenkörnchen, Russ und anderen nicht definierbaren organischen Bestandteilen.

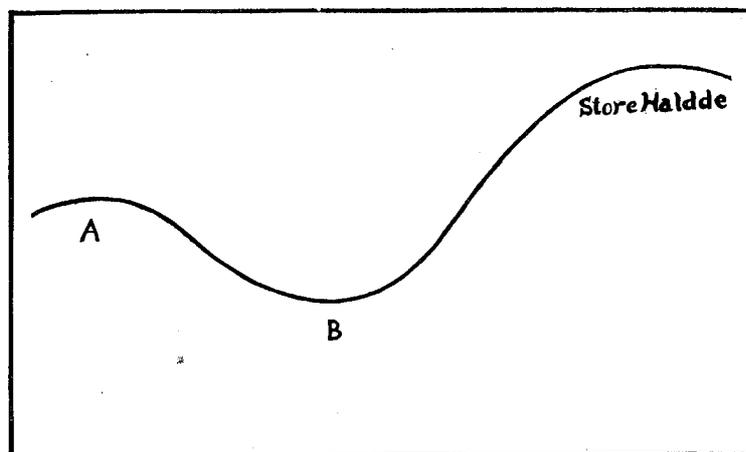
leicht überzeugen. Nachdem eine Anzahl von Tröpfchen so zusammengekittet ist, dass die Masse zu fallen anfängt, ruft diese ihrerseits Wirbel hervor. Hierdurch wird eine immer grössere Anzahl von unterkühlten Tröpfchen zum Gefrieren gebracht.

Die Auflösung der Wasserwolken durch Schneebildung in der Weise, wie ich sie hier erwähnt habe, ist nicht ungewöhnlich, ist aber nicht die einzige.

Wirbel in der Luft entstehen nicht nur durch fallende Körper. Eine Gebirgskette ruft zum Beispiel eine ausserordentlich lebhaftete Wirbelbewegung hervor, deren Wirkung sich noch weit ab von den Gebirgen zu erkennen gibt. Zwei derartige Wirbelbildungen mit einem gewaltigen Gefrieren unterkühlten Wassers und heftigem Schneefall möchte ich näher beschreiben.

Zwecks meiner Kondensations- und Niederschlagsstudien besuche ich oft einen Gipfel, Store Halde genannt. Auf diesem Gipfel, der sehr oft in Wolken eingehüllt ist, befinden sich gewaltige Nebelfrostablagerungen. Seine Seehöhe beträgt ca. 1100 m.

Um ihn zu besteigen, folge ich meist einer Bergkette mit mehreren kleinen Gipfeln. In einiger Entfernung von Store Halde, von diesem durch eine Versenkung in der Kette getrennt, ist einer dieser Gipfel belegen, als A in der Skizze bezeichnet. Das Profil eines Stückchens der Kette, Store Halde und A mit einbegriffen, stellt Skizze 1 dar.



Skizze 1.

Kommt man bei widrigem Sturm und Nebel über

A nach B, wird man von einem Eisregen getroffen. Die steinharten Partikel werden vom Winde gewaltig ins Gesicht getrieben. Hat man sich über A gekämpft und ist in das Tal B gekommen, befindet man sich in einem herrlichen Schneefall mit grossen Schneeflocken. Noch weit hinauf am Abhang von Store Halde hält dieser Schneefall an. Auf dem Store Halde fällt kein oder verhältnismässig wenig Schnee, es lagern sich indessen grosse Mengen von Nebelfrost ab.

Wenn der Wind über das Tal weht, entsteht ein Saugwirbel. Die Turbulenz der Luft wird dadurch in hohem Grade erhöht. Es muss ein lebhaftes Zusammenstossen eintreten, hauptsächlich in dem Gebiete, wo Hauptströmung und Wirbelströmung sich begegnen. An der unteren Grenze der Hauptströmung werden die gefrorenen Tröpfchenansammlungen mit dieser Strömung fortgerissen und kommen mit grosser kinetischer Energie bis A an. Weiter nach unten, wo die horizontale Strömung nicht so stark ist, fallen die Eisklumpchen zu Boden. Wenn Frostübersättigung existiert, entsteht auf ihnen eine lebhaftete Eiskristallisation und sie erreichen als Schneeflocken den Boden. Demgemäss liegt in dem Tale (B) meist viel Schnee. Da dieser sehr gleich verteilt und nicht in Haufen getrieben war, obgleich das Tal in der Lee der gewöhnlichen Winde lag, hatte ich sehr lange meine Aufmerksamkeit darauf gerichtet. Bei A finden Nebelfrostablagerungen — jedoch nicht sehr grosse — statt. Hier ist also die Auflösung der Wolke nicht zu Ende gebracht.

Der zweite Fall gibt uns das Beispiel einer vollständigen Auflösung der Wolken durch Turbulenz. Westlich vom Halde-Observatorium liegt eine Bergkette, die zum Teil

niedriger als Halde ist. Zwischen dieser Kette und dem Observatorium sind zwei Täler durch eine flache Erhöhung von einander getrennt. Auf der Bergkette setzen sich teilweise bei westlichen Winden grosse Mengen von Nebelfrost ab. In den Tälern und auf der flachen Erhöhung fallen grosse Schneemengen. Beim Observatorium haben wir an derartigen Tagen selten Nebelfrost. (Interessante Ausnahmen gibt's, die mit dieser Darlegung nichts zu tun haben). Dagegen fällt immer Schnee aus Eisklumpchen bestehend. Durch die Turbulenz ist die Auflösung der Wolken so weit getrieben, dass Nebelfrost nicht mehr gebildet werden kann.¹ Der Schnee kann sehr oft als Graupeln charakterisiert werden.

Viele andere Beispiele derartiger Auflösung habe ich sowohl auf dem Halde als auf dem Pärtetjåkko im schwedischen Lappland gesehen und studiert. Die hier erwähnten mögen indessen hinreichend sein anzugeben.

Aus dieser Darlegung kann man unmittelbar schliessen, dass die Tröpfchen eine bestimmte Grösse haben müssen, damit das Gefrieren in turbulenter Luft auch durch gewaltsames Zusammenstossen möglich sein kann. Die Turbulenz ist nämlich auch während des Aufsteigens der Luft über ein Gebirge gross. Hier haben wir freilich Schneefall, die Wolke wird indessen nicht aufgelöst.

Die beiden letzten Beispiele zeigen eine lebhaftere Schneebildung. Es ist natürlich, dass die Energie des Windes und dadurch auch der Turbulenz durch die freigemachte Wärme erhöht wird. Andererseits ist es von Bedeutung, dass die Schneebildung auch ruhig vorgeht, weil die Sturmenergie andernfalls oft unbehaglich erhöht werden würde. (In welchem Grade Kondensation die Sturmenergie erhöhen kann, siehe Margules, Met. Zeitschr. 1906).

Ich halte es für sehr wahrscheinlich, dass die Turbulenz der Luft auch in der freien Atmosphäre eine wesentliche Rolle für die Auflösung der Wasserwolken unter 0° spielt. N. Shaw² hält es für sicher, dass die Turbulenz wolkenbildend wirkt. Er gibt mehrere Beispiele davon. Es ist nach seiner, durch sehr gute direkte und indirekte Beobachtungen bestätigten Darlegung klar, dass die Turbulenz sehr hoch wirksam ist.

Folgende Schlüsse kann ich also aus dieser Darlegung ziehen:

Die Schneebildung in Wolken, die aus fliessenden Wassertröpfchen bestehen, kann dadurch erklärt werden, dass die Tröpfchen unter ruhigen Verhältnissen nur bis zu einer gewissen Grösse in unterkühltem Zustande existieren können. Schon ehe sie diese Grösse erreicht haben, gefrieren sie, wenn sie gewaltsam zusammengeschleudert werden. In beiden Fällen dienen die gefrorenen kleinen Eispartikelchen als Kondensationskerne für Eis und kristallisieren selbst allmählich.³ Wegen der Turbulenz und des hierdurch hervorgerufenen gewaltsamen Zusammenprallens entsteht ein sehr dichter Schneefall.

Hierdurch ist die Schneebildung vollständig erklärt. (Im zweiten Kapitel werden neue Tatsachen erwähnt, wodurch gezeigt wird, dass die Tröpfchen im allgemeinen durch Zusammenfliessen wachsen. Hierdurch wird diese Darlegung noch einfacher zu verstehen und der Verlauf tritt noch klarer hervor).

¹) Diese Auflösung der Wolken hat in Skandinavien die vollständig unrichtige Vorstellung hervorgerufen, dass nur ganz spezielle Winde nebelfrostführend sein können. Keinen Grund kann man für eine solche Behauptung finden. Dies geht auch aus meiner Arbeit, »Studien über die Nebelfrostablagerungen«, u. s. w., hervor.

²) *Sir Napier Shaw*, Manual of Meteorology, Part 4, Chapter 5, pp. 41–56.

³) Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Sublimation durch die Temperaturerhöhung beim Gefrieren der Tröpfchen verhindert wird. In diesem Falle [Siehe Note 2] muss die Kristallbildung nur aus Tröpfchen entstanden sein. Bei sehr grosser Unterkühlung ist es wahrscheinlich, dass die Kristallisationsgeschwindigkeit so gross ist, dass ein Schneestern fast augenblicklich entstehen kann. Diese Eventualität muss indessen bewiesen werden. Bis dies getan ist, muss man annehmen, dass Sublimation eine grosse Rolle spielt.

Weitere Beobachtungen, die die obenstehende Darlegung stützen.

1°. Nach meiner ersten Mitteilung und dem ersten Teil dieser Abhandlung bestehen die Tröpfchen in den Wolken aus einer Salzlösung. Führt man ein Volumen einer verdünnten Lösung in die Kälte, scheidet sich praktisch genommen zunächst nur Eis aus. Der Rückstand wird dadurch immer konzentrierter, und seine Gefrieretemperatur sinkt. Schliesslich wird der flüssige Rückstand eine Konzentration erreichen, die dem eutektischen Punkte entspricht. Wenn die Temperatur hinreichend niedrig wird, scheidet sich wie bekannt eine Mischung von Salzhydrat und Eis aus.

Gefriert jetzt ein Tröpfchen aus einer verdünnten Chlornatriumlösung bei einer Temperatur über -21.2° , kann nicht das ganze Tröpfchen gefrieren. Man muss einen Rückstand erhalten, mit einer Salzkonzentration, deren Gefrierpunkt einer etwas niedrigeren Temperatur entspricht, und die umso verdünnter und also an Volumen grösser ist, je höher die Gefrieretemperatur ist. Entwickelt sich ein Kristall aus einem solchen gefrorenen Tröpfchen, kann man flüssiges Wasser in einem solchen Kristall finden. Wenn mehrere zusammengekittete Tröpfchen Keime einer solchen Kristallbildung sind, scheint es mir nicht unmöglich, dass diese anfangs an durch Eis getrennten, flüssigen Lösungen während der Kristallisation der gefrorenen Tröpfchen verbunden werden können.

Sind meine Beobachtungen richtig, muss man also in Schneekristallen zuweilen flüssiges Wasser antreffen, und zwar umso mehr je höher die Temperatur ist. In der Tat ist Wasser angetroffen worden. *Hann* erwähnt, dass C. Nordenskiöld es in kapillären Hohlräumen eines Kristalls nachgewiesen hat. Leider ist es mir nicht gelungen eine passende Methode für solche Untersuchungen zu finden. Indessen wäre es eine schöne Aufgabe der Mikrochemie diese winzigen Wassermengen zu analysieren. Nach meinen Beobachtungen ist das Vorhandensein dieses Wassers nicht nur erklärlich; sondern es muss notwendigerweise zugegen sein, da die Schneekristalle beweislich aus Tröpfchen entstanden sind.

2°. Nach meinen Beobachtungen muss die Chlormenge des Schnees mit seiner Bildungsart und seiner weiteren Entwicklung beim Erreichen des Bodens schwanken. Fallen die fein ausgebildeten Sterne z. B. bei nebelfreiem Schneewetter, muss man erwarten, dass die Chlormenge, falls Chlor überhaupt vorkommt, zum wenigsten gering ist. Sind nämlich die Kondensationskerne Tröpfchen, ist so viel Eis darauf auskristallisiert, dass die Verdünnung sehr gross ist. Sind die Kondensationskerne nicht Tröpfchen, dürfte man kein Chlornatrium finden. Fallen tröpfchenbesetzte Kristalle, sollte man mehr Chlor erwarten. In Betracht davon, dass die Grösse der Tröpfchen im Vergleich mit diesen Kristallen sehr winzig ist, muss man jedoch in diesen viel weniger als in den Tröpfchen erwarten. Fallen Klümpchen zusammengekitteter und gefrorener Tröpfchen, kann man ungefähr gleich viel wie im Nebelfrost erwarten. Es ist jedoch selten, dass nur solche Bildungen fallen. Bei Analysen von Schneewasser wird man daher sehr wechselnde Chlormenge erhalten. Dies ist auch in der Tat der Fall. Ich gebe in untenstehender Tabelle einige Ergebnisse von Schneewasseranalysen. Sie sind für Chlornatrium pr. Liter ausgerechnet. Siehe hierüber auch die Note 2.

Tabelle 5.

	Gramm NaCl per Liter Schmelzwasser	Anmerkungen
1.	$5 \cdot 10^{-4}$	Kristalle, nicht näher untersucht.
2.	$24 \cdot 10^{-4}$	Eisschnee von Westen.
3.	$45 \cdot 10^{-4}$	Eisklümpchen von Westen bei Nebel in Auflösung.

	Gramm NaCl per Liter Schmelzwasser	Anmerkungen
4.	$5 \cdot 10^{-4}$	Wohl ausgebildete Kristalle.
5.	0000	Eingehend untersuchte ausgebildete Kristalle, bei schwacher Bewölkung gefallen.
6.	$3 \cdot 10^{-4}$	Tröpfchenbesetzte Kristalle von Osten.
7.	$59 \cdot 10^{-4}$	Klümphen von Westen, bei sehr dichtem Schneefall.

Übrigens zeigen die Analysen mit hinreichender Deutlichkeit, dass meine obenstehende Darlegung, die auf direkten Beobachtungen gebaut ist, richtig sein muss. Sie zeigen indessen auch, dass die Chlormenge, die gefunden wird, bei den verschiedenen Tröpfchen gebunden ist und also Kondensationskerne für das Wasser gewesen ist, oder mit anderen Worten, sie zeigen, dass meine ganze Darstellung des Kondensationsproblems konsequent durchgeführt ist. Meine Ansicht, dass die Tröpfchen ein verdünntes Meer im kleinen ist, erhielt also hier noch eine Bestätigung.

3°. Oben ist kurz erwähnt, dass die rückstehenden Tröpfchen bei der Schnee- bildung teilweise verdunsten müssen. Durch die Sublimation wird die Dampfspannung der Luft erniedrigt. Die Dampfspannung der Tröpfchen wird dadurch grösser als der Druck des Dampfes in der Luft und der Radius muss durch Verdunstung vermindert werden.

Eine solche Verminderung des Tröpfchenradius mag man bei ruhigen Verhältnissen beobachten können. Entstehen bei ruhigen Verhältnissen z. B. Vollkristalle in Gegenwart von vielen anderen Kondensationskernen oder auf gefrorenen Tröpfchen, und fallen diese Kristalle nicht zu Boden, muss es eintreffen können, dass diese Kristalle allmählich die optische Rolle der Tröpfchen übernehmen. Man sollte dann erst eine Verminderung des Radius der Partikelchen und später eine Vergrösserung der Partikelchen finden. In der Tat habe ich eben einen solchen Fall beobachtet. Ganz kürzlich (17. Februar 1921) beobachtete ich rings um den Mond Ringe, die von mir gemessen wurden. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6.

Tröpfchenmessung am 17. Februar 1921.

Radius der Partikelchen		
6° 15 ^m p	7° 0 ^m p	9° 5 ^m p
$1.35 \cdot 10^{-3}$ cm.	$9.22 \cdot 10^{-4}$ cm.	$3.42 \cdot 10^{-3}$ cm.
$1.35 \cdot 10^{-3}$ »	$9.01 \cdot 10^{-4}$ »	$4.43 \cdot 10^{-3}$ »
$1.35 \cdot 10^{-3}$ »	$8.68 \cdot 10^{-4}$ »	$4.12 \cdot 10^{-3}$ »
$1.24 \cdot 10^{-3}$ »	$8.04 \cdot 10^{-4}$ »	$4.43 \cdot 10^{-3}$ »
$1.32 \cdot 10^{-3}$ »	$8.32 \cdot 10^{-4}$ »	$4.12 \cdot 10^{-3}$ »
$1.12 \cdot 10^{-3}$ »	$1.04 \cdot 10^{-3}$ »	$3.42 \cdot 10^{-3}$ »
$1.14 \cdot 10^{-3}$ »	$9.74 \cdot 10^{-4}$ »	$3.24 \cdot 10^{-3}$ »
$1.17 \cdot 10^{-3}$ »		

Die Werte sind in der Tabelle in der Reihenfolge angegeben, wie sie gefunden sind. Bei der Messung, die um 9° 5^m ausgeführt wurde, trat auch 22° Halo in derselben Wolke auf. Dies ist ein Beweis dafür, dass man mit Eiskriställchen zu tun hatte. Ich kann mir jetzt keine andere natürliche Erklärung dieser Grössenveränderung denken als die oben gegebene.

Ergebnisse des ersten Kapitels.

1^o. Die Möglichkeit der Frostübersättigung in Gegenwart von Salzlösungen in nicht unterkühltem Zustande ist nachgewiesen. Hierfür wurde eine sehr praktische Formel des Radius entwickelt, die eine Bedeutung für dynamische Probleme erhält.

2^o. Die allgemeine Existenz von Wassertröpfchen in der MgNa-Zone bis zu -28° , ist nachgewiesen.

3^o. Die Auflösung von Wasserwolken durch Schneebildung ist dargelegt, und viele Verhältnisse sind dadurch erklärlich geworden. Es hat sich herausgestellt, wie diese Schneebildung durch mehrere der hier erwähnten Verhältnisse (wie Wasser in Kristallen, Veränderung der Tröpfchengrösse, Menge von Chlor in Schneemassen u. s. w.) eine Stütze für die in voriger Mitteilung dargelegten Ergebnisse bildet. Alle Ergebnisse bilden übrigens ein ausserordentlich harmonisches Gebäude, wo man keine Widersprüche findet.

Es gibt einige andere Verhältnisse, die ich gefunden, aber hier nicht berücksichtigt habe, die diese Resultate sicherlich noch verbessern sollen. Dazu gehört die in einer Fussnote erwähnte Tatsache, dass die Tröpfchen im allgemeinen positiv geladen sind. Weiter, dass eine Reihe sehr interessanter Messungen eine nicht unbedeutende Menge von radioaktiver Strahlung des Nebelfrostwassers ergeben haben. Diese Verhältnisse, in die Betrachtungen eingeführt, werden die endgültigen Ergebnisse nur verbessern, aber nicht die Darstellungsmethode im Prinzip verändern. Ich habe sie daher ohne Gefahr vernachlässigen und nur die Tragweite des Vorhandenseins von Salz suchen können. Ich musste jedoch hier bei gesättigten Lösungen stehen bleiben und die Verhältnisse beim eventuellen Auskristallisieren von Salz unberücksichtigt lassen. Die Behandlung dieses Gegenstandes erfordert, wie schon erwähnt, einige physikalische Messungen.

Kapitel 2.

(Eingeliefert 18. November 1921).

Über die Tröpfchengrössen in Wolken und Nebel. — Die Messungen von Tröpfchengrössen sind optisch und mikroskopisch ausgeführt. Die optischen Messungen bestehen in einer sehr schnellen Ausmessung der Kränze rings um eine starke Lichtquelle, die parallele Strahlen aussendet. Gleichzeitig wurde zuweilen die Glorie und der weisse Regenbogen, die man immer sah, ausgemessen. Die Lichtquelle war ein elektrischer Scheinwerfer. Die Strahlen wurden durch Reflexion an einem paraboloidischen Spiegel parallel. Das Licht wurde daneben mit einem metallischen Schirm abgeblendet, so dass es durch eine kreisrunde Öffnung von ungefähr 15 cm. Diameter ausstrahlte. Der Scheinwerfer wurde auf dem Gipfel des Gebirges plaziert. Dieser Gipfel ist sehr spitzig und ragt frei in die Atmosphäre empor. Selbst stand ich auf einem kleinen Plateau, das auf dem Dache des Observatoriums für Polarlichtuntersuchungen gebaut ist. Da das Observatorium auf einem Gebirgsplateau unweit unter dem Gipfel gelegen ist, war mein Stand nahezu in gleicher Höhe mit der Lichtquelle; zwischen uns lag eine Strecke von etwa 40 Meter, wo freie Luft mit Nebel oder Fractuswolken strömte. Eine grosse Anzahl Messungen sind zuweilen gleichzeitig auch im Mondlichte ausgeführt und haben immer dieselben Ergebnisse gezeigt, wie die im künstlichen Lichte. Einen Teil habe ich auch durch Messungen im Sonnenschein erhalten. Immer wurde natürlicherweise darauf beachtet, dass wirklich Wassertröpfchen gemessen wurden.

Die mikroskopischen Messungen bestanden darin, dass die Tröpfchen, die sich auf

Drähte mit dem Diameter $7 \cdot 10^{-3}$ cm. oder $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. absetzten, gemessen wurden. Die Drähte wurden zu diesem Zwecke mit Fett eingeschmiert.

Zur Auswertung der optischen Messungen ist folgende wohlbekannte Formel¹ (11) angewandt.

$$2r = (n + 0.22) \cdot \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad (11)$$

Hier bezeichnet r den Tröpfchenradius, n die Ordnung des roten Ringes, α den Winkel des äusseren Randes des roten Ringes und λ die Wellenlänge des weissen Lichtes, die gleich 0.0000571 cm. ist.

Die optischen Messungen nehmen an Genauigkeit nach einem Radius ungefähr gleich $1.4 \cdot 10^{-3}$ cm. schnell ab. Dies beruht darauf, dass die Messungsfehler mit abnehmendem Winkel sich im Resultate immer mehr geltend machen. Man kann sich leicht davon durch Studium der Formel (11) überzeugen. Dies spielt eine umso grös-

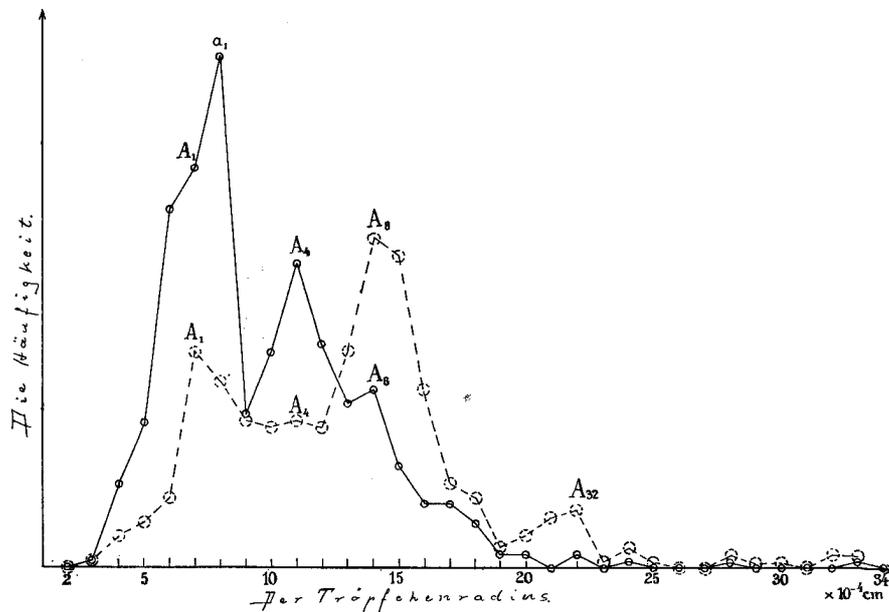


Fig. 12.

sere Rolle, da die Ringe bei wachsenden Tröpfchen immer undeutlicher werden. Die Ursache davon folgt als Korollarium meiner folgenden Darlegung.

Für kleine Tröpfchen ($r < 4\mu$) gilt nach Mecke² die Formel (11) nicht, weil da ausser Beugung auch Brechungsphänomene hinzutreten. Nicht unwesentliche Fehlerquellen gibt's also bei den optischen Messungen. Indessen wird sich zeigen, dass die grösste Häufigkeit der Radien im Intervall liegt, wo die optische Methode sehr gut ist.

Die mikroskopischen Messungen sind in ihrer Ordnung immer mehr oder minder individuell beeinflusst. Ausserdem sind sie auch mit anderen, nicht immer leicht abzuschätzenden Fehlern behaftet.

¹) J. M. Pernter u. F. M. Exner, Meteorologische Optik, Wien und Leipzig 1910 S. 443. Für die Theorie besser P. Drude, Lehrbuch der Optik Leipzig 1912 S. 174 ff. oder etwas ausführlicher in A. Winkelmann, Handbuch der Physik, B. 6, Optik, S. 1032—1119 (Author F. Pockels).

²) Reinhard Mecke, Experimentelle und theoretische Untersuchungen über Kranzerscheinungen im homogenen Nebel, Ann. der Physik 1920, B. 61, S. 479 und B. 62, S. 623.

Daher bediene ich mich hier hauptsächlich nur der Ergebnisse der optischen Messungen. Die mikroskopischen werden nur beiläufig angewandt. Bemerkte sei indessen, dass die beiden Messungsmethoden, bei denselben Gelegenheiten angewandt, immer dieselbe Grössenordnung gegeben haben, mit Abweichungen nur im Bereich der Fehlergrenzen.

Die Genauigkeit, womit ich im folgenden den Radius angebe, setzt einen Fehler bis zu 3 Minuten in der Ausmessung voraus. Mit so grosser Genauigkeit kann eine Messung auch mit der von mir angewandten Geschwindigkeit leicht ausgeführt werden.

Die Messungen sind sowohl im Sommer als im Winter in einem Temperaturintervall von -20° bis $+10^{\circ}$ ausgeführt. Optische Messungen wurden schon 1918 versuchsweise angefangen, die meisten aber sind in den Jahren 1920 und 1921 ausgeführt, und sie werden in Verbindung mit anderen Untersuchungen ununterbrochen fortgesetzt.

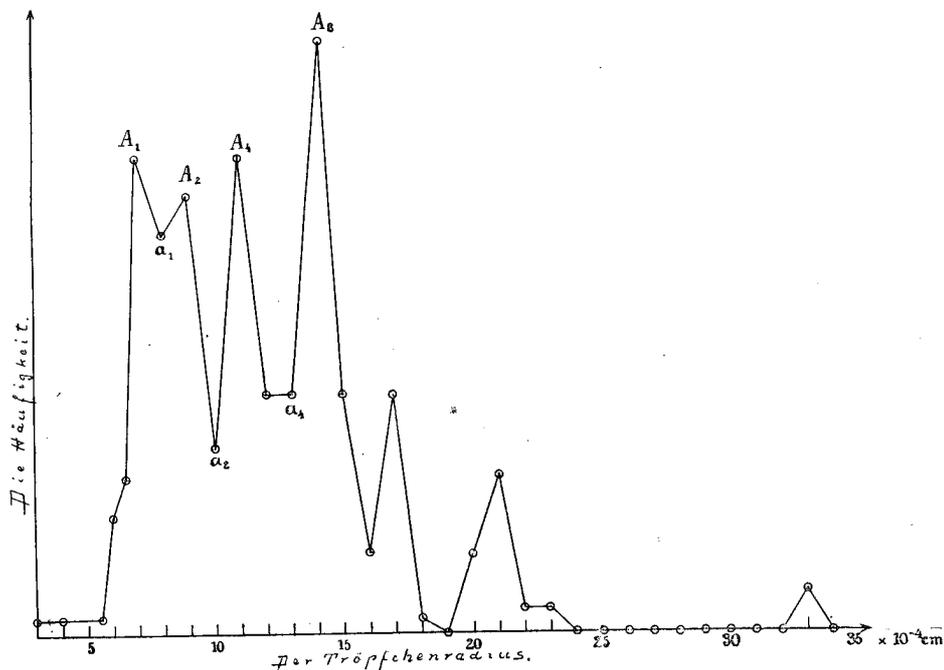


Fig. 13.

Um die Ergebnisse zu studieren, ist es hier nicht zweckmässig, Mittelwerte zu bilden. Ich habe daher Häufigkeitskurven gezeichnet. Da es sich zeigte, dass die mittlere Tröpfchengrösse in Temperaturintervallen von 5° dieselbe war, einerseits für alle Messungen über 0° , andererseits für die unter 0° , habe ich das Material erst in nur zwei Teile zerlegt. Ein Teil enthält alle Messungen unter 0° , der andere die über 0° . In Figur 12 sind beide Häufigkeitskurven gezeichnet. (Die ausgezogene Kurve stellt die Ergebnisse über 0° und die gestrichelte die unter 0° dar.) Längs der Abscisse sind die Tröpfchenradien, längs der Ordinate die wahre Anzahl der Einzelmessungen, die eine bestimmte Tröpfchengrösse gegeben haben, abgesetzt.

Aus dieser Figur 12 sieht man, dass die Tröpfchengrösse sowohl im Sommer als im Winter die gleiche ist. Selbst der Gang der beiden Kurven ist nicht sehr verschieden. Meine frühere Beweisführung der allgemeinen Existenz von fließenden Wassertröpfchen in den Wolken wird durch diese Tatsache kräftig gestützt.

Die Kurven zeigen sehr ausgeprägte Maxima. Um diese genauer studieren zu können, mache ich eine neue Einteilung des Materials, die von der Temperatur unabhängig vorgenommen ist. Zuerst nehme ich die Messungen, die bei ruhigen Nebel- oder Wol-

kenverhältnissen ausgeführt sind. (Mit ruhigen Nebelverhältnissen meine ich, dass die Tröpfchengröße während der Messungsserie konstant oder ruhig veränderlich ist). Die bei solchen Gelegenheiten erhaltenen Ergebnisse habe ich in folgender Weise behandelt: Wenn die Tröpfchengröße während der Messung sich nur wenig verändert hat, ist das Mittel der ganzen Messungsserie genommen. Haben sich die Tröpfchengrößen stark verändert, findet man deutlich eine Gruppenverteilung. In diesem Falle habe ich das Mittel jeder Gruppe ausgerechnet. Die Anzahl Messungen, die eine bestimmte Tröpfchengröße gegeben haben, ist also hier gleich der Anzahl Serien, die diese Tröpf-

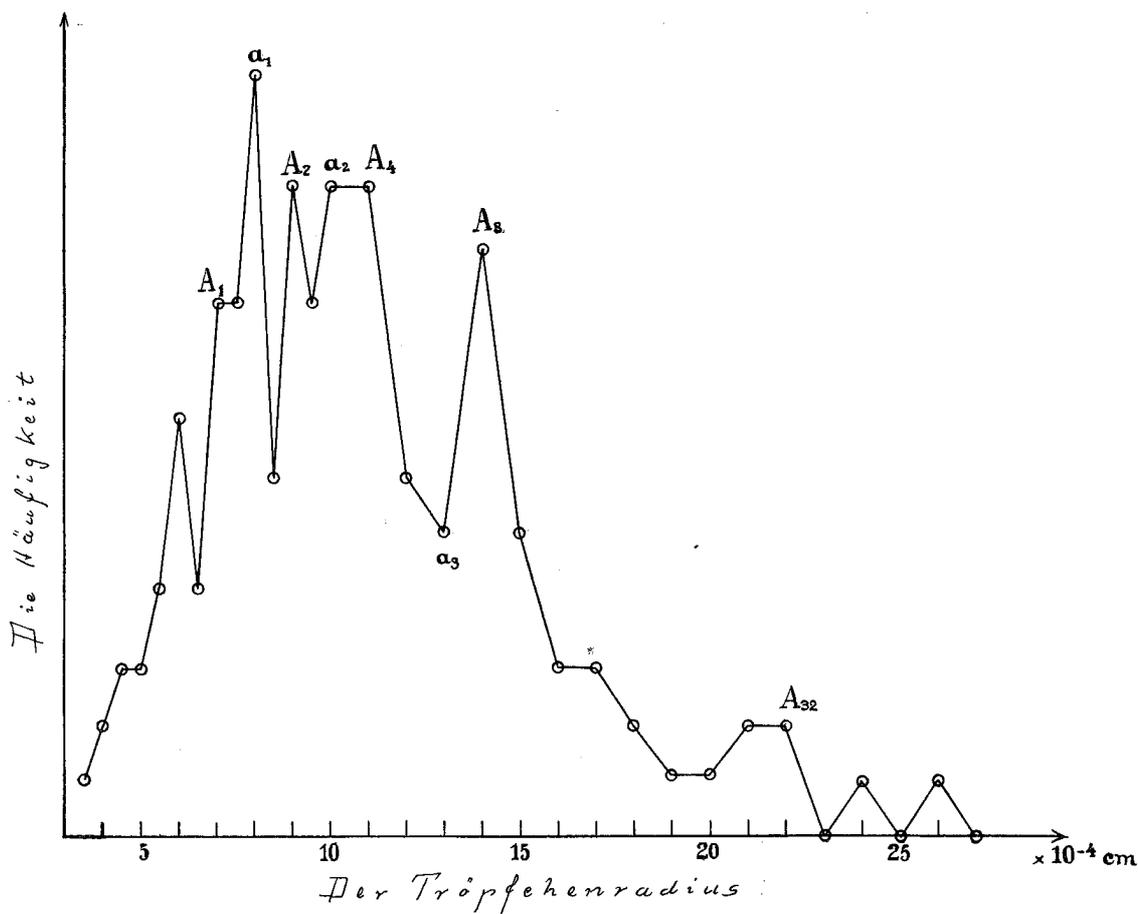


Fig. 14.

chengröße enthalten. In Figur 13 ist diese Anzahl in Prozenten der ganzen Anzahl Messungsserien als Ordinate aufgezeichnet. Die Maxima sind mit $A_1, A_2, A_4, A_8, \dots$ bezeichnet, die Minima mit $a_1, a_2, a_4, a_8, \dots$. Die grossen Buchstaben entsprechen folgenden Radien: $7 \cdot 10^{-4}, 9 \cdot 10^{-4}, 11 \cdot 10^{-4}, 14 \cdot 10^{-4}$ cm., die kleinen $8 \cdot 10^{-4}, 10 \cdot 10^{-4}, 13 \cdot 10^{-4}, 16 \cdot 10^{-4}$ cm.; man findet leicht, dass, wenn zwei Tröpfchen A_1 zusammenfließen, ein Tröpfchen A_2 entsteht. Vier Tröpfchen A_1 bilden A_4 , und 8 Tröpfchen A_1 bilden A_8 . Dieselben Relationen gelten für $a_1, a_2, a_4, a_8, \dots$.

Ich benenne eine Serie Tröpfchen wie die A_1 eine Gruppe und eben diese Serie die 7-Gruppe. Die Minima werden sich als eine 8-Gruppe zeigen.

Die Gruppenverteilung zeigt sich auch sehr deutlich in Figur 12. Nach obenstehender Darlegung ist es wohl berechtigt, auch diese Kurven, wo jede Einzelmessung für sich genommen ist, als ein reelles Bild der wirklichen Verhältnisse anzugeben. Man bemerkt hier für Temperaturen unter 0° ausgeprägte Maxima für A_1, A_8 und A_{32} . Eine

kleine Erhöhung der Häufigkeit findet man für A_4 . Im Sommer ist das absolute Häufigkeitsmaximum bei a_1 zu finden. Relative Maxima haben wir indessen bei A_4 und A_8 . Man sieht hieraus, dass im Winter die 7-Gruppe über der ganzen Kurve vorherrschend ist, und sich bis auf $22 \cdot 10^{-4}$ streckt. Im Sommer dagegen haben wir ein Tröpfchen aus der 8-Gruppe als absolutes Maximum. Später überwiegt jedoch wieder die 7-Gruppe. Zu bemerken ist auch, dass die Häufigkeit im Sommer schon nach dem Radius $1.1 \cdot 10^{-3}$ sehr schnell abnimmt.

Um die Gruppen noch etwas näher studieren zu können, nehme ich zur Hilfe den Teil meiner Ergebnisse, der in Wolken und Nebeln mit schnell wechselnden Tröpfchengrößen gefunden ist. Aus diesen Ergebnissen geht die Figur 14 hervor. Die Kurve ist wie die vorige gebildet. Indessen habe ich für kleine Tröpfchen, wo die optische Methode besonders gut ist, den Radius auf $5 \cdot 10^{-5}$ abgerundet. Die so erhaltene Kurve zeigt ebenfalls ausgeprägte Gruppenverteilung. Bei A_1 hat man ein Knie. Häufigkeitsmaxima finden sich dann bei A_2, A_4, A_8 und A_{32} . Für a_1 haben wir auch hier ein absolutes Maximum und für a_2 ein relatives. Für grössere Tröpfchen spielt die 8-Gruppe wieder eine untergeordnete Rolle.

Der Umstand, dass die Radien für kleine Tröpfchen etwas genauer ausgerechnet sind, bewirkt, dass man für Radien auch unter $7 \cdot 10^{-4}$ kleine Unregelmässigkeiten findet. Bei einem Radius gleich $6 \cdot 10^{-4}$ haben wir ein relatives Maximum. Dieser Radius gehört zu keinen von den hier definierten Gruppen. Bei $4.5 \cdot 10^{-4}$ bis $5.0 \cdot 10^{-4}$ haben wir ein Knie. $4.5 \cdot 10^{-4}$ gehört zur 7-Gruppe und $5.0 \cdot 10^{-4}$ zur 8-Gruppe. Diese Unregelmässigkeiten können indessen kein Beleg für eine Gruppenverteilung auch bei diesen kleinen Tröpfchen sein. Die mikroskopischen Messungen zeigen jedoch Verhältnisse, die, im Zusammenhang mit der Kurve betrachtet, auch hier auf eine Gruppenverteilung deuten. Die Bemerkung vorausschiekend, dass die mikroskopischen Messungen nicht hinreichend scharf sind, um zwischen den beiden hier erwähnten Gruppen zu unterscheiden, will ich einige Serien mikroskopischer Messungen hinzufügen, die ich vollkommen willkürlich aus meinem Material gewählt habe.

Tabelle 7.

$8 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-4}$	} Winter- messungen
$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	
$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	} Sommermessungen	
$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$		
$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$		

Die beiden ersten Messungen sind im Winter ausgeführt. Für kleine Tröpfchen zeigen sie eine deutliche Gruppenverteilung. Die drei letzten sind Sommerserien und stellen die 8-Gruppe dar. Für sich betrachtet, beweisen diese Serien oder die vielen anderen von meinen mikroskopischen Messungen die Gruppenverteilung nicht. Sieht man sie aber in Verbindung mit den Kurven, kann man mit grosser Wahrscheinlichkeit annehmen, dass die Gruppenverteilung auch für kleinere Tröpfchen als A_1 vorkommt.

Über die Genauigkeit der Gruppeneinteilung. — In einem Intervalle von $4 \cdot 10^{-4}$ bis $7 \cdot 10^{-4}$ cm. ist es berechtigt, die Radien bis auf $1 \cdot 10^{-5}$ cm. anzugeben. Indessen können alle Unregelmässigkeiten in einer Häufigkeitskurve von Radien, die so wenig von einander verschieden sind, nicht als reell betrachtet werden. Die Figur 15 zeigt eine Häufigkeitskurve für kleine Radien, ganz wie Fig. 13 und 14.

Man sieht hier für einen Radius gleich $4.4 \cdot 10^{-4}$ ein sehr ausgeprägtes Maximum.

Wenn zwei Tröpfchen von diesem Radius zusammenfliessen, erhält man ein Tröpfchen mit dem Radius $5.5 \cdot 10^{-4}$. Für diesen hat man kein Maximum. Dagegen hat man bei $7 \cdot 10^{-4}$ cm., wie früher erwiesen ist, ein ausgeprägtes Maximum, und diesen Radius erhält man, wenn 4 Tröpfchen $4.4 \cdot 10^{-4}$ cm. zusammenfliessen. Für die Radien $4.0 \cdot 10^{-4}$ und $5.0 \cdot 10^{-4}$ finden sich auch Häufigkeitsmaxima, die wegen der Verteilung der anderen Häufigkeiten wirklich existieren dürften. Von den anderen Maxima dieser Figur ist sehr wahrscheinlich auch das Maximum für den Radius $6.2 \cdot 10^{-4}$ cm. eine Realität. Dieser Radius gehört zu keinen von den beiden früher erwähnten Gruppen. 8 Tröpfchen von diesem Radius bilden ein Tröpfchen mit dem Radius $1.24 \cdot 10^{-3}$ cm. In der Tat erhalte ich aus meinen Messungen für $1.25 \cdot 10^{-3}$ ein sehr ausgeprägtes Maximum, das aus den Kurven nicht ersehen werden kann. Zwei Tröpfchen vom Radius $6.2 \cdot 10^{-4}$ geben den Radius $7.812 \cdot 10^{-4}$ cm. und gehen also in die 8 Gruppe der frühe-

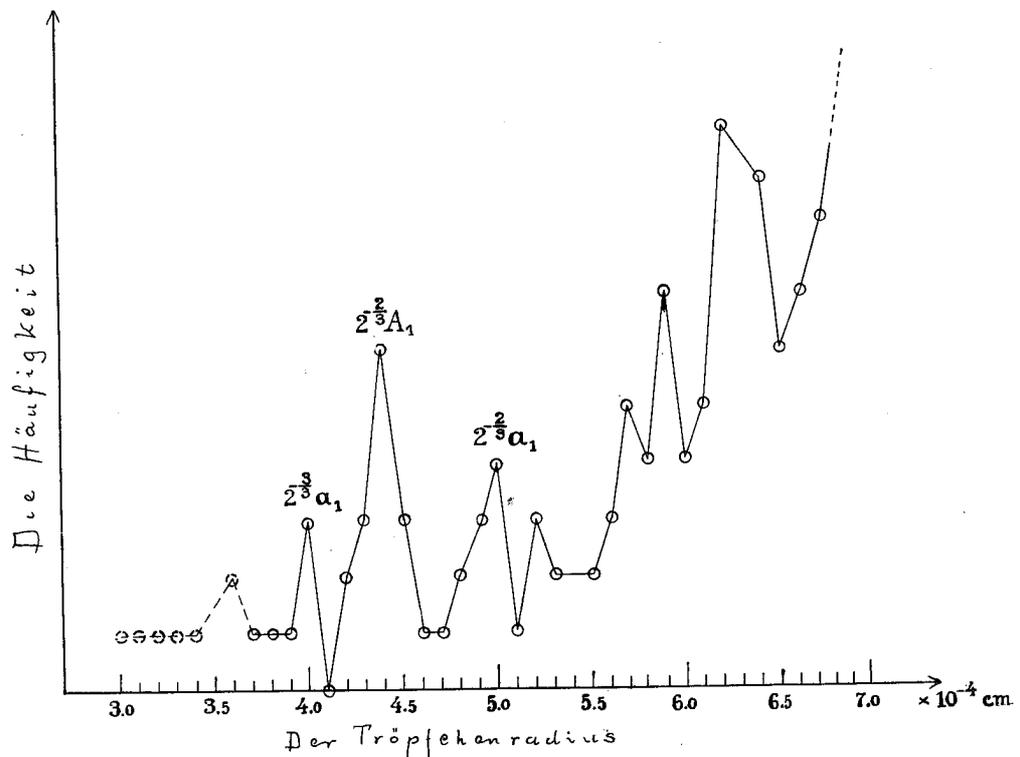


Fig. 15.

ren Figuren ein. Daraus sieht man, dass die früher definierte 8-Gruppe wenigstens zwei Untergruppen enthalten kann. Ob der für die 8-Gruppe repräsentative Radius $8.00 \cdot 10^{-4}$ cm. beträgt, kann ich daher nicht aus meinen Messungen sehen. Der Umstand, dass sowohl $4.0 \cdot 10^{-4}$ cm. als $5.0 \cdot 10^{-4}$ cm. ein Maximum liefern, macht es wahrscheinlich, dass dieser repräsentative Radius nicht weit von $8.9 \cdot 10^{-4}$ cm. liegt.

Die 7-Gruppe scheint recht rein zu sein. Den Radius $6.996 \cdot 10^{-4}$ cm. erhält man, wenn 4 Tröpfchen $4.4 \cdot 10^{-4}$ cm. zusammenfliessen, und das Häufigkeitsmaximum dieses Radius ist allzu ausgeprägt, um eine Zufälligkeit zu sein. Dazu kommt, dass hier die Messungs- und Berechnungsmethode für diese Grösse günstig ist. Das Häufigkeitsmaximum in Figur 13 für $9.0 \cdot 10^{-4}$ liegt eigentlich meinen Messungen nach bei $8.9 \cdot 10^{-4}$ und zwei Tröpfchen von A_1 liefern einen Radius gleich $8.82 \cdot 10^{-4}$. Diese Übereinstimmung ist gut. Wahrscheinlich ist also diese hier auf dem Halbde so ausgeprägte Gruppe wirklich sehr nahe bei $7.0 \cdot 10^{-4}$ repräsentiert. Meine Messungen zeigen zwei-

schen 7 und 8 mal 10^{-4} zwei relative Maxima, denen ich jedoch — wenigstens bis jetzt — keine reelle Bedeutung zuschreiben kann, da die Genauigkeit der Messungen nicht hinreichend gross ist. Solche Unregelmässigkeiten muss man immer finden, wenn die Anzahl Messungen nicht unendlich gross ist. Ich kann also hier behaupten, ohne Gefahr zu laufen einen Fehler zu machen, dass die 7-Gruppe gerade durch $7.0 \cdot 10^{-4}$ repräsentiert ist, und dass diese hier definierte Gruppe sehr rein ist.

Gruppen und Kondensationskerne. — Diese hier nachgewiesene Gruppenverteilung der Tröpfchengrössen wird jetzt in Verbindung mit den Kondensationskernen studiert und vorzugsweise in Verbindung mit dem Salzvorkommen betrachtet. Zu diesem Zwecke ist Tabelle 8 für 0° ausgerechnet.

Für die gefundene und früher erwähnte Cl-Quantität, 0.00358 gr. per Liter Wasser, ist die totale Salzmenge wie früher (S. 7) berechnet. Diese Darlegung, wo ich minder die absolute Dampfspannung als die Tröpfchengrösse beachtet, ist exakt. Die Dampfspannung ist indessen in der Tabelle ausgerechnet und zwar wie früher. In den horizontalen Reihen bezeichnet e die Dampfspannung über dem kleinem Tröpfchen für verschiedene α^3 u β^3 . F bezeichnet das Verhältnis dieser Dampfspannung zu dem Dampfdruck in gesättigter Luft bei 0° in Prozent. r bezeichnet den Radius der Tröpfchen in cm. Die Dampfspannung ist mit nur zwei Dezimalen angegeben und F zu ganzen Zahlen abgerundet. Grössere Genauigkeit anzustreben, hat keinen Zweck. Der Radius ist mit nur einem Dezimal im Faktor zur negativen Potenz von 10 etwas inkonsequent abgekürzt.

Die α^3 sind in folgender Weise gewählt. Für einen Radius gleich $7 \cdot 10^{-4}$ cm. wird die Salzmenge unter Voraussetzung der gefundenen Konzentration aller Meeressalze berechnet. Daraus erhielt ich $\alpha^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$. Die α^3 , die kleiner als dieser Wert sind, habe ich durch Multiplikation mit 8^{-n} ($n = 1, 2, 3, 4 \dots$), die grösseren durch Multiplikation mit 2^{+n} ($n = 1, 2, 3 \dots$) erhalten. β^3 ist bis $\beta^3 = 53.56$ mit Rücksicht auf die Konzentrationen gewählt, für welche die Dampfspannung über einer ebenen Lösungsfläche nach *Landolt-Börnstein*, Physikalisch-Chemische Tabellen S. 410 bei 0° für NaCl-Lösung genau bestimmt ist. Für grössere β^3 ist Rücksicht auf die hier angewandte Konzentration genommen. $\beta^3 = 34660$ entspricht sehr nahe der obengenannten Konzentration. Wenn ein Tröpfchen mit dem Radius $7 \cdot 10^{-4}$ cm. von dieser Konzentration zu einem Tröpfchen mit $r = 8 \cdot 10^{-4}$ wächst, wird $\beta^3 = 51568$.

Durch die obengenannte Wahl von den α^3 erreichte ich, dass in jeder β^3 -Kolonne jeder Tröpfchenradius zu derselben Gruppe gehört. In der Kolonne $\beta^3 = 34660$ befindet sich die 7-Gruppe, wo jedoch für $\alpha^3 < 9.325 \cdot 10^{-1}$ nur jedes dritte Tröpfchen angeführt ist. In der Kolonne rechts davon findet man die 8-Gruppe. Da $r = \alpha \cdot \beta \cdot 2.2 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{v'}$ ist, kommt man durch Multiplikation von $\beta^3 = 34660$ mit $\frac{2^{\pm n}}{v'}$, wo im allgemeinen v' vernachlässigt werden kann, auch zur 7-Gruppe. Wenn man also eine Tabelle aufsetzt worin die α^3 von den niedrigsten bis zu den höchsten Werten auseinander durch Multiplikation von 2^{+n} ($n = 1, 2, 3 \dots$) und die β^3 von den niedrigsten Werten ebenso durch Multiplikation mit $\frac{2^{+n}}{v'}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) gebildet werden, erhält man sowohl in Reihen als in Kolonnen überall dieselbe Gruppe, und wenn eine der Kolonnen $\beta^3 = 34660$ und eine der Reihen $\alpha^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$ enthält, erhält man allerdings nur die 7-Gruppe. Wenn man in einer derartigen Tabelle von einem bestimmten Wert von β^3 z. B. von $\beta^3 = \beta_1^3$ zu $\frac{2^{-1}}{v'} \beta_1^3$; $\frac{2^{-2}}{v'} \beta_1^3$ u. s. w. ginge, so müsste man, um denselben Radius immer

Tabelle 8.

		$\beta^3 = 0.86$	$\beta^3 = 1.18$	$\beta^3 = 1.50$	$\beta^3 = 4.05$
$\alpha^3 = 2.846 \cdot 10^{-5}$	e	4.28	4.49	4.84	4.94
	F	93	102	105	108
	r	$6.4 \cdot 10^{-7}$	$7.1 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$
$\alpha^3 = 2.276 \cdot 10^{-4}$	e	3.85	4.27	4.46	4.67
	F	84	93	97	102
	r	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$
$\alpha^3 = 1.821 \cdot 10^{-3}$	e	3.65	4.07	4.26	4.54
	F	80	89	93	99
	r	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$
$\alpha^3 = 1.457 \cdot 10^{-2}$	e	3.55	3.98	4.17	4.48
	F	78	87	91	98
	r	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$5.7 \cdot 10^{-6}$	$6.2 \cdot 10^{-6}$	$8.6 \cdot 10^{-6}$
$\alpha^3 = 1.165 \cdot 10^{-1}$	e	3.51	3.93	4.13	4.45
	F	77	86	90	97
	r	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$	e	3.49	3.91	4.11	4.43
	F	76	85	90	97
	r	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 1.865 \cdot 10^{\pm 0}$	e	3.48	3.91	4.10	4.43
	F	76	85	90	97
	r	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 3.730 \cdot 10^{\pm 0}$	e	3.48	3.90	4.10	4.43
	F	76	85	90	97
	r	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 7.460 \cdot 10^{\pm 0}$	e	3.47	3.90	4.09	4.43
	F	76	85	89	97
	r	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$6.9 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 1.492 \cdot 10^{+1}$	e	3.47	3.90	4.09	4.43
	F	76	85	89	97
	r	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$8.6 \cdot 10^{-5}$
$\alpha^3 = 2.984 \cdot 10^{+1}$	e	3.47	3.90	4.09	4.42
	F	76	85	89	97
	r	$6.5 \cdot 10^{-5}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
$\alpha^3 = 5.967 \cdot 10^{+1}$	e	3.47	3.89	4.09	4.42
	F	76	85	89	97
	r	$8.2 \cdot 10^{-5}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$
$\alpha^3 = 1.19 \cdot 10^{+2}$	e	3.47	3.89	4.09	4.42
	F	76	85	89	97
	r	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$

$\beta^3 = 8.68$	$\beta^3 = 53.56$	$\beta^3 = 600$	$\beta^3 = 4480$	$\beta^3 = 34660$	$\beta^3 = 51568$	$\beta^3 = 224000$
5.03	4.79	4.68	4.64	4.60	4.60	4.60
110	105	102	101	100	100	100
$1.4 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
4.71	4.68	4.63	4.60	4.59	4.59	4.59
103	102	101	100	100	100	100
$2.8 \cdot 10^{-6}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-5}$	$8.2 \cdot 10^{-5}$
4.61	4.62	4.60	4.59	4.59	4.59	4.58
101	101	100	100	100	100	100
$5.52 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$
4.56	4.60	4.60	4.59	4.58	4.58	4.58
100	100	100	100	100	100	100
$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$
4.54	4.58	4.59	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$2.2 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$
4.53	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$4.4 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$5.7 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$8.8 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$7.0 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$5.6 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$8.8 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$7.1 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$8.9 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$5.8 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$1.8 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$
4.52	4.57	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
99	100	100	100	100	100	100
$2.2 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$9.1 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$

zu finden, auch im Falle man von der Reihe $\alpha^3 = a_1^3$ ausgegangen wäre, von diesem Wert zu $a_1^3 \cdot 2^{+1}$; $a_1^3 \cdot 2^{+2}$ u. s. w. gehen. Von dieser gedachten Tabelle wird weiterhin Gebrauch gemacht werden.

Über die möglichen Ursachen der Gruppen. — Es liegt sehr nahe die Gruppenverteilung dadurch zu erklären, dass ein Zusammenfliessen von Tröpfchen stattfindet. Ich habe das Wort Zusammenfliessen auch schon früher benutzt. Es dürften aber auch andere Ursachen bestehen, und im weiteren werde ich diejenigen, die mir jetzt denkbar erscheinen, einer genaueren Prüfung unterziehen und dabei auch das eventuelle Zusammenfliessen ein wenig näher studieren.

1. Die Kondensation findet stufenweise statt, so dass man immer von β_1^3 zu $\frac{2^{+1}}{v} \beta_1^3$ kommt.
2. Die Salzpartikelchen oder andere möglichen Kondensationskerne befinden sich immer in einer Verteilung $2^{\pm n} a_1^3$.
3. Die Tröpfchen wachsen, nachdem sie eine bestimmte Grösse erreicht, hauptsächlich durch Zusammenfliessen von gleich grossen Tröpfchen.
4. Eine Zusammenwirkung aller oder nur zwei von diesen Möglichkeiten.

1. Eine stufenweise Kondensation würde z. B. für die Verwandlung eines Tröpfchens von $5.56 \cdot 10^{-4}$ cm. zu $7.00 \cdot 10^{-4}$ cm. erfordern, dass eine augenblickliche Ausfällung von $4 \cdot 10^{+13}$ Wassermoleküle = $1.25 \cdot 10^{-9}$ gr. Wasser stattfände. Für grössere Tröpfchen würde diese Menge grösser, für kleinere natürlich kleiner sein. Wenn wir also annehmen wollen, dass eine solche quantische Kondensation stattfindet, müssen die Quanta mit den Tröpfchenradien veränderlich und zwar gleich $4/3 \cdot \pi \cdot r^3$ sein, wenn r der Radius des wachsenden Tröpfchens ist. Mir scheint es natürlicher, dass eine eventuelle quantische Kondensation proportional der Oberfläche sei. (Es scheint mir auch natürlich, dass eine solche wirklich stattfindet). Damit eine quantische Kondensation die hier dargelegte Gruppenverteilung erklären soll, muss indessen eine Menge Wasserdampf rings um das Tröpfchen gesammelt werden, die gleich dem Gewichte des vorhandenen Tröpfchens sein muss. Diese Konzentration von Wasserdampf erfordert, dass rings um die Tröpfchen Übersättigung stattfindet, welche Übersättigung mit dem Radius wachsen muss. Nach dem, was wir bisher wissen, ist eine solche lokale Übersättigung unwahrscheinlich. Daher kann die Gruppenverteilung wahrscheinlich nicht durch quantische Kondensation erklärt werden.

2, 3 und 4. Die drei letzten Eventualitäten können in einem Zusammenhange behandelt werden. Wenn die Tröpfchen durch Zusammenfliessen wachsen, muss auch α^3 wachsen und zwar in der Serie $2^{\pm n} a_1^3$. Wenn man also in der Atmosphäre in einer bestimmten Zone ein bestimmtes $\alpha^3 = a_1^3$ hat und die gleich grossen Tröpfchen mit diesem a_1^3 zusammenzufließen anfangen, ohne dass sie als Niederschlag zum Boden fallen, sondern wieder in immer trockeneren Gegenden getrieben werden, so erhält man eine Serie α^3 , die durch $2^n a_1^3$ ausgedrückt werden können. Tritt Kondensation auf diesen jetzt sehr konzentrierten Tröpfchen ein, wachsen sie mit grossen α^3 schneller und werden zuerst sichtbar. Die mit kleineren α^3 folgen langsamer. Wenn die Maxima der Dampfspannung von allen Tröpfchen einmal überstiegen sind, ist der Fall nicht undenkbar, dass bei einem höheren β^3 als diesen Maxima entsprechend eine Tröpfchenverteilung in Gruppen erhalten werden kann, wo man indessen keinen grösseren Unterschied der Tröpfchenradien erwarten darf. Für das Grössenintervall, das ich für die Tröpfchen erhalten habe (Fig. 13 u. s. w.), ist die Verteilung möglich. Welche Gruppe man in diesem Falle erhält, beruht

auf der Grösse des ursprünglichen a_1^3 und auf der Konzentration im Messungsaugenblick. Gesetzt, dass die Tröpfchen im allgemeinen dieselbe Salzkonzentration haben, kann man, wenn das ursprüngliche a_1^3 sehr gewöhnlich ist, die Häufigkeitsmaxima der Tröpfchengrösse bei einer bestimmten Gruppe erhalten. In diesem Falle ist es indessen auch sehr schwer zu beurteilen, ob die Gruppe durch ein Zusammenfliessen oder durch die Verteilung von a^3 entstanden ist. Letztere beruht ja auf ersterem. Ich will versuchen, aus meinen Untersuchungen zu beurteilen, welche Wahrscheinlichkeit der einen oder der anderen Eventualität zugeschrieben werden kann.

$a^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$ wurde unter der Voraussetzung berechnet, dass man für einen Radius exakt gleich $7.00 \cdot 10^{-4}$ cm. eine Konzentration von Salz hatte, die exakt 0.00358 gr. Cl per Liter Wasser entsprach. Die Genauigkeit der ersten Annahme habe ich früher diskutiert und als richtig bezeichnet. Die letzte Annahme ist ein wenig willkürlich. Wenn man die a^3 konstant hält und eine Konzentrationsschwankung von 0.14 mgr. Cl annimmt, entspricht dies einer Veränderung im Radius für $7.00 \cdot 10^{-4}$ gleich $1 \cdot 10^{-5}$. Ist dagegen der Radius konstant, entspricht die Konzentrationsschwankung im $a^3 = 9.325 \cdot 10^{-1}$ einer Veränderung von etwa $\pm 4 \cdot 10^{-2}$, und für die andere a^3 in der Tabelle entsprechenden Grössen, deren Angabe ich für unnötig halte. Der obere Wert der hier erwähnten a^3 wird also gleich $9.725 \cdot 10^{-1}$ und der untere Wert gleich $8.975 \cdot 10^{-1}$ gesetzt.

Auf Seite 9 habe ich die untere Grenze von a^3 als $7.01 \cdot 10^{-6}$ gesetzt. Wir finden nun das sehr auffallende Verhältnis, dass der obere Wert von a^3 sehr nahe durch $2^{+n} \cdot 7.42 \cdot 10^{-6}$ ausgedrückt werden kann. Der untere Wert von a^3 kann dagegen durch $2^{+n} \cdot 6.73 \cdot 10^{-6}$ ausgedrückt werden, wie die in der Tabelle aufgeschriebenen a^3 durch $2^{+n} \cdot 7.10 \cdot 10^{-6}$, das heisst, dass die untere Grenze der a^3 ein Glied in der Serie dieser Grössen ist, die ich in der Tabelle angegeben habe. Ist dies keine Zufälligkeit — und wir werden sehen, dass es mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Realität ist — müssen die aus dem Meere getriebenen Tröpfchen in einer Gruppe verteilt sein, oder die Salzpunktelehen in der Atmosphäre schliesslich diese Verteilung erhalten. Keine von diesen Eventualitäten scheint mir undenkbar. Die untere Grenze von a^3 wurde, wie man sich erinnert, dadurch berechnet, dass ich annahm, dass nur ein Atom Br mitgerissen wurde. Werden zwei Atome Br mitgerissen, erhält man schon die doppelte Salzmenge. Unter diesen Umständen muss man sich indessen denken, dass immer 2^n Br₂ mitgerissen werden. Ob dies durch schon ausgeführte Untersuchungen bestätigt ist, weiss ich leider nicht. Wenn nicht, wäre es sehr wünschenswert, dass die Physiker das Zersprühen des Meereswassers von diesen Gesichtspunkten aus eingehende Untersuchungen unterwürfen.

Auf Seite 26 wurde im Zusammenhang mit der Schneebildung erwähnt, wie die Turbulenz der Luft ein Zusammenprallen der Tröpfchen hervorrief, aber dass dabei die Tröpfchen gefroren. Es wurde dort auch hervorgehoben, dass sehr kleine Tröpfchen an der Schneebildung nicht teilnehmen können. Andererseits habe ich alle Grössen von etwa $7 \cdot 10^{-4}$ cm. in dieser Bildung wahrgenommen.

Wolken unter 0° , die in ruhiger Luft schweben, können bisweilen sehr stabil sein. Jedoch weiss man mit Sicherheit, dass Kräfte existieren, die ein Zusammenfliessen anstreben, was sowohl aus Analogien mit der Kolloidchemie¹ geschlossen werden kann, als auch aus rein hydrodynamischen Gesichtspunkten² zu vermuten ist. Folglich muss

¹) Der erste Meteorolog, der die Bedeutung der kolloidchemischen Ergebnisse für die Meteorologie nachgewiesen hat, scheint A. Schmauss zu sein, der in Met. Z. 1920 S. 1 eine beachtenswerte Abhandlung, »Kolloidchemie und Meteorologie«, darüber publiziert hat.

²) W. Schmidt, Zur Erklärung der gesetzmässigen Verteilung der Tröpfchengrösse bei Regenfällen, Met. Zeitschr. 1908 S. 496.

man auch in ruhiger Luft ein Zusammenfliessen erwarten. Da die Radien hier bis $2.3 \cdot 10^{-3}$ cm. erreichen können, fangen die Tröpfchen unter ruhigen Verhältnissen wahrscheinlich erst nach Erreichen dieser Grösse an, im allgemeinen beim Zusammenfliessen zu gefrieren. Werden sie dagegen in turbulenter Luft gewaltsam zusammengetrieben, gefrieren sie schon früher.

Hieraus folgt, dass ein Zusammenfliessen unter 0° möglich scheint, ohne dass die Tröpfchen dabei gefrieren.

Kann das Zusammenfliessen allein die Gruppenverteilung der Tröpfchen erklären? — Man muss diese Frage mit Nein beantworten, weil man bejahenden Falls entweder nur eine Gruppe oder eine so grosse Anzahl erwarten müsste, dass die einzelnen Gruppen durch Messungen unmöglich zu unterscheiden wären. Werden dagegen die Kondensationskerne zu Hilfe genommen, können die Gruppen erklärt werden. Zu diesem Zwecke formuliere ich folgenden Satz: Die Tröpfchengruppen können erklärt werden in der Voraussetzung, dass das Zusammenfliessen für verschiedene Kondensationskerne bei verschiedenen Grössen eintritt, und zwar so, dass die Grösse der Kondensationskerne keine Rolle spielt, sondern nur deren Art. Mit z. B. den kleinen Salzpunktelehen als Kondensationskerne muss das Zusammenfliessen von der Konzentration unabhängig bei einer bestimmten Grösse anfangen, und dabei kann man nur eine Gruppe erhalten, oder noch kurzer ausgedrückt: Das Zusammenfliessen fängt an bei $r = r_1 = \text{Konst.} = \alpha\beta \cdot 2.2 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{v}$ oder bei $\alpha \cdot \beta = \text{Konst.}$ ($\sqrt[3]{v}$ kann vernachl. werden). Je grösser α ist, desto kleiner ist also β beim Zusammenfliessen und umgekehrt. Für andere Arten von Kondensationskernen gelten ähnliche Gesetze.

Die Voraussetzungen habe ich durch Winteranalysen genauer Prüfung unterworfen. Wie schon erwähnt, überwiegt im Winter die 7-Gruppe. Es ist also wahrscheinlich, dass die 7-Gruppe durch die Meeressalze charakterisiert ist, und dass daher die Tröpfchengrösse, bei welcher das Zusammenfliessen in diesem Falle anfängt, zur 7-Gruppe gehört. Kann dies bewiesen werden, folgt unmittelbar, dass die anderen Gruppen von anderen Kondensationskernen abhängig sind. Für meine Beweisführung, die auf experimentellen Tatsachen baut, will ich die Aufmerksamkeit auf die (Seite 37) beschriebene Tabelle, auf die Tabelle 8 und auf die hervorgehobene Serie von $\alpha^3 = 2^{+n} \cdot 7 \cdot 10^{-6}$ lenken.

Ist eine Verteilung von α^3 eine Realität, und gelten die Voraussetzungen, die ich aufgestellt habe, um die Gruppen durch Zusammenfliessen erklären zu können, so müssen die gefundenen Cl-Mengen per Liter Wasser sich zueinander wie 2^n verhalten.

Meine Analysen zeigen in der Tat diese Verteilung.

Die Analysen sind folgenderweise behandelt: Aus den Analysen, die sich nur wenig von einander unterscheiden, habe ich die Mittelwerte berechnet. Daraus ist folgende Tabelle gebildet.

Tabelle 9.

1.	0.000856 · 4 = 0.003427
2.	{ (0.001805 · 2 = 0.003610)
	{ 0.001556 · 2 = 0.003112
3.	0.003350 · 1 = 0.003350
4.	0.007148 · 1/2 = 0.003573
5.	0.029240 · 1/8 = 0.003656

Alle Werte sind also auf einen Wert reduziert, der in der Nähe von meinem früher angewandten liegt. Je kleiner die Konzentration ist, desto schwieriger ist natürlich eine Analyse. Die beiden letzten Werte sind daher die besten. Der Mittelwert von diesen gibt 0.003615 gr., während die Grösse 0.00358 von mir früher angewandt ist. Dass ich eben diesen Wert gewählt habe, beruht darauf, dass drei Analysen, die in sehr genau untersuchtem Nebelfrost ausgeführt sind, gerade diesen Wert geliefert haben. Der zweite Wert ist nicht sehr gut. Dieser enthält die Cl-Analyse, bei welcher ich das Verhältnis Cl/Mg gleich 6 erhielt (S. 6). Wenn ich für die Cl-Menge in diesem Falle das Mittel der Cl-Analyse und der Cl-Menge setze, die ich aus der Mg-Analyse berechne, erhalte ich als Mittel für den zweiten Wert in der Tabelle $0.001805 \cdot 2 = 0.003610$ gr., den ich in der Tabelle in Parenthese gesetzt habe.

Ich will mit dieser Tatsache als Ausgangspunkt einige Rechnungen ausführen zwecks der Untersuchung auch anderer Analysenergebnisse. Diese Untersuchungen werden in derselben Weise wie zuvor behandelt und die sich daraus ergebenden Schlüsse dann gezogen werden.

Durch das Zusammenfliessen von Tröpfchen bleibt natürlicherweise die Konzentration unverändert, die α^3 dagegen werden mit 2^{+n} ($n = 1, 2, 3 \dots$) multipliziert. Haben die α^3 im allgemeinen die von mir angenommene Verteilung, so wird diese Verteilung durch ein Zusammenfliessen nicht zerstört. Ich nehme an, dass diese Verteilung eine Realität ist, und dass daneben ein Zusammenfliessen stattfindet. Ich will dann untersuchen, zu welchen Gruppen man geführt wird, wenn man aus einem willkürlichen α^3 in der Tabelle 8 und von den Konzentrationen meiner einzelnen Analysen ausgeht. Da β^3 durch die Konzentration bestimmt ist, und also sowohl α als β bekannt ist, kann der Radius aus der Formel $r = \alpha \cdot \beta \cdot 2.2 \cdot 10^{-5}$ ($\sqrt[3]{v'}$ kann vernachlässigt werden) berechnet werden. Diese Rechenoperationen können auch für Regenwasser ausgeführt werden. Die Grösse des Radius, die man vermittels dieser Rechenoperationen erhält, beruht auf der Wahl von α^3 in der Serie. Man kommt indessen zu derselben Gruppe, wie α^3 auch gewählt wird. Ich multipliziere nötigenfalls die erhaltenen Radien mit $2^{\pm \frac{n}{3}}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$), was einer Multiplikation von α^3 mit $2^{\pm n}$ entspricht, bis ich in der Nähe meiner repräsentativen Radien bin. Ich habe somit die Tabelle 10 erhalten.

Tabelle 10.

α^3	r	Gruppe
9.33 · 10 ⁻¹	7.34 · 10 ⁻⁴	—
9.33 · 10 ⁻¹	7.96 · 10 ⁻⁴	8
9.33 · 10 ⁻¹	7.17 · 10 ⁻⁴	7
2.33 · 10⁻¹	8.30 · 10⁻⁴	—
9.33 · 10 ⁻¹	6.89 · 10 ⁻⁴	7
9.33 · 10 ⁻¹	7.54 · 10 ⁻⁴	—
9.33 · 10 ⁻¹	7.01 · 10 ⁻⁴	7
3.73 · 10^{±0}	6.89 · 10⁻⁴	7
9.33 · 10 ⁻¹	8.17 · 10 ⁻⁴	8
4.67 · 10⁻¹	7.58 · 10⁻⁴	—
2.33 · 10⁻¹	7.28 · 10⁻⁴	7?
7.46 · 10^{±0}	8.39 · 10⁻⁴	—
2.33 · 10⁻¹	7.03 · 10⁻⁴	7
9.33 · 10 ⁻¹	7.01 · 10 ⁻⁴	7
1.17 · 10⁻¹	6.90 · 10⁻⁴	7
7.46 · 10^{±0}	7.18 · 10⁻⁴	7
2.33 · 10⁻¹	7.03 · 10⁻⁴	7

Tabelle 10 (fortges.)

α^3	r	Gruppe
$9.33 \cdot 10^{-1}$	$7.69 \cdot 10^{-4}$	—
$9.33 \cdot 10^{-1}$	$7.01 \cdot 10^{-4}$	7
$4.67 \cdot 10^{-1}$	$7.09 \cdot 10^{-4}$	7¹⁾
$4.67 \cdot 10^{-1}$	$6.89 \cdot 10^{-4}$	7 ²⁾

¹⁾ Analyse auf Mg und Cl.

²⁾ Analyse auf Mg u. Cl (Cl Mittel beider Analysen).

In dieser Tabelle habe ich α^3 , r und die Gruppe angegeben, auf welche man durch die Rechenoperation geführt wird. Ist hier $\alpha^3 > 9.33 \cdot 10^{-1}$, war die Konzentration grösser als die von mir früher angewandte. Ist $\alpha^3 < 9.33 \cdot 10^{-1}$, war die gefundene Konzentration kleiner. Für solche Konzentrationen sind die Werte in der Tabelle fett gedruckt. Es zeigt sich jetzt, dass von den 11 Werten, wo eine grössere oder kleinere Konzentration vorhanden war, 7 Radien zur 7-Gruppe gehören, wovon jedoch einer als unsicher zu betrachten ist. Von den 21 Analysen führten unter den gemachten Voraussetzungen 13 auf die 7-Gruppe, zwei auf die 8-Gruppe und 6 auf nicht definierte Gruppen. 6 Analysen führten auf Werte, die sich minder als $1 \cdot 10^{-5}$ von gerade $7.00 \cdot 10^{-4}$ unterscheiden.

Indem man dabei festhält, dass das Zusammenfliessen bei einer bestimmten Tröpfchengrösse anfängt, muss diese Grösse die Gruppe bestimmen. Wir haben hier meist für Tröpfchen, die aus Salzkörnchen gebildet sind, die 7-Gruppe gefunden. Wenn die Gruppe durch Zusammenfliessen gebildet oder aufrechterhalten ist, so muss also das Ausgangströpfchen bei Meeressalzen als Kondensationskerne zur 7-Gruppe gehören. Der Umstand, dass sehr oft diese Gruppe für andere Konzentrationen als die gewöhnliche gefunden wurde, führt mit sich, dass dies Ausgangströpfchen von der Konzentration unabhängig ist.

Der Umstand, dass ich von einer bestimmten α^3 -Gruppierung ausging und dabei diese Ergebnisse erhielt, macht es auch sehr wahrscheinlich, dass diese Gruppierung $2^{+n} \cdot 7 \cdot 10^{-6}$ eine Realität ist. Wäre ich nämlich von einer anderen Verteilung von α^3 ausgegangen, hätte ich andere Gruppen erhalten müssen. Indessen ist die 7-Gruppe nach den Tröpfchenmessungen im Winter überwiegend, wodurch bewiesen wird, dass die Verteilung der α^3 , wie ich sie gewählt habe, wirklich existiert.

Ich habe also durch diese Darlegung folgendes nachgewiesen: Die 7-Gruppe ist durch die Salzpartikelchen bestimmt. Die Gruppenverteilung von Tröpfchen, die aus Partikelchen aus den Meeressalzen bestehend entwickelt sind, kann dadurch erklärt werden, dass die Partikelchen eine bestimmte Verteilung $\alpha^3 = 2^{+n} \cdot 7 \cdot 10^{-6}$ haben, und dass die Tröpfchen durch Zusammenfliessen wachsen. Für sich allein kann keines dieser beiden Verhältnisse die Gruppe erklären. Eine quantische Kondensation könnte mit Hilfe der Gruppierung von α^3 die Tröpfchengruppe erklären. Ich habe das Vorkommen dieser quantischen Kondensation früher als unwahrscheinlich bezeichnet, was auf dem jetzigen Standpunkt unseres Wissens zweifellos richtig ist. Die obenstehende Erklärung ist daher die einzig denkbare.

Schliesslich will ich versuchen, inwiefern Analysen, die früher auf Regenwasser¹ aus-

¹⁾ Nach dem Lesen meiner ersten Abhandlung teilte mir Herr Professor Axel Hamberg in Uppsala mit, dass Chlor schon früher — im Regenwasser — gefunden sei. Er hatte auch die Güte mir eine Abhandlung zu senden, in welcher er dies erwähnt und daraus einige Folgerungen

geführt sind, zu denselben Ergebnissen führen und werde erst dann die Abweichungen in der Tabelle studieren.

Als Mittel im Winter fand *E. Kinch*¹ nach seinen im Laufe von 16 Jahren in Cirencester (England) gemachten Beobachtungen 0,00358 gr. Chlor per Liter Regenwasser. *N. Passerini*² fand unweit Florenz Chlorgehalte, die zwischen 0.000168 gr. und 0.024177 gr. per Liter schwankten.

Die Übereinstimmung von Kinchs Mittelwert mit dem meinen (0.00358) ist vollständig.

Untersuchen wir meiner Methode gemäss, auf welche Gruppe diese Konzentrationen führen, so zeigt sich keine sehr gute Übereinstimmung mit meinen Ergebnissen. Die von Kinch gefundene Mittelkonzentration führt auf einen Radius gleich $7.00 \cdot 10^{-4}$ cm. Die Konzentrationen von Passerini führen auf bzw. $7.7 \cdot 10^{-4}$ cm. und $7.4 \cdot 10^{-4}$ cm. Die Abweichung ist hier allzu gross. Aber den Umstand in Betracht nehmend, dass die Regentropfchengrössen im Verhältnis zu den Wolkenröpfchen sehr gross sind und ihr Zuwachs daher verschiedenen Einflüssen stark unterworfen ist, darf man auf Grund dieser beiden Analysen keine bessere Übereinstimmung erwarten. Die Tatsache, dass die beiden Chemiker dieselbe Grössenordnung wie ich gefunden haben, mag hinreichend sein, um meine Ergebnisse zu bestätigen. Die Abweichungen können auch folgenderweise dargelegt werden:

Über die Abweichungen der Tabelle 10. — In der Tabelle 10 fanden wir nicht immer die 7-Gruppe; wären nämlich die Verhältnisse so rein, wie ich sie dargelegt habe, so hätte man nur diese Gruppe finden sollen. Die übrigens erstaunlich kleinen Abweichungen sind zudem sehr leicht erklärlich. Zunächst muss man beachten, dass Kondensation auf die 7-Gruppe, wenn überhaupt Kondensation in gewöhnlichem Sinne besteht, nicht ausgeschlossen ist. Dazu kommt, dass sich oft Schneekristalle in den Nebelfrost mischen, wodurch man im allgemeinen zu kleine Konzentration erhält, um genaue Analysenergebnisse erlangen zu können. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Analysen, die nicht zur 7-Gruppe führten, grösstenteils darauf beruhen. Es gibt indessen andere Gründe der Abweichungen.

Für Messungen über 0° wurde der Radius $8 \cdot 10^{-4}$ sehr oft gefunden. Diese Radiusgrösse ist auch im Winter vorhanden. Meiner früheren Entwicklung gemäss, müssen alle anderen Gruppen als die 7-Gruppe auf andere Kondensationskerne gebildet sein. Es wird sich hier zeigen, dass dies auch aus anderen Gründen wahrscheinlich ist. Im Sommer sprechen viele Gründe dafür, dass auch in der MgNa-Zone andere Kondensationskerne zahlreich vorkommen. Solche Kerne stammen in sehr grossen Mengen aus der Pflanzenwelt. Ätherische Öle, Harz, Pollenkörnchen u. s. w. füllen die Luft. So hoch, wie z. B. auf dem Pärtetjåkko im schwedischen Lappland (Seehöhe 1850 m.) wurden im Sommer die Schneeflecken von solchen organischen Partikelchen bedeckt. Daneben ist es eine allgemein bekannte Tatsache, worauf ich zurückkommen werde, dass anorganische stickstoffhaltige Verbindungen in der Atmosphäre vorkommen. Schon

für die Gletscherkunde macht. Die Abhandlung, die in »Bihang til K. Svenska Vet Akad. Handlingar« Band 21 Afd. 2 No. 2 1895 publiziert war, trug die Überschrift: Studien über Meereis und Gletschereis von Axel Hamberg. In dieser Abhandlung wird auf zwei Mitteilungen im Chemischen Centralblatt 1887 und 1894 hingewiesen, wo Analysen auf Cl im Regen beschrieben sind.

¹⁾ Chemisches Centralblatt 1887. In *Hambergs* Arbeit steht als Mittel per Jahr 0.00338 gr. per L. Regenwasser. Der obenstehende Winterwert habe ich durch meinen Bruder, Ingeniör S. Köhler, Stockholm, erhalten.

²⁾ Chemisches Centralblatt 1894 (Zitiert nach Hamberg l. c.). Es ist mir unmöglich gewesen diese Zeitschrift zu erhalten.

deshalb liegt es ausserordentlich nahe anzunehmen, dass die 8-Gruppe aus anderen Kondensationskernen gebildet ist, und weil die 8-Gruppe auch im Winter vorkommt, dass sie aus einem löslichen Kern entstanden ist.

Im Winter ist die 7-Gruppe vorherrschend (ohne jedoch immer rein zu sein), was dadurch zu erklären ist, dass andere Kondensationskerne dann nicht so gewöhnlich sind. Es mag sich auch so verhalten, dass die meisten der anderen Kondensationskerne keine unterkühlten Tröpfchen bilden können, sondern Schneesterne durch Sublimation direkt hervorrufen.

Über den Stickstoffgehalt des Niederschlages. — A. Petermann und J. Graftiau¹ haben während dreier Jahre 142 Analysen auf Stickstoff im Regen ausgeführt. Ich habe ihre Ergebnisse ein wenig studiert und dabei in folgender Weise verfahren.

Wenn Salpetersäure und Ammonium gleichzeitig vorhanden waren, ist es angenommen, dass die Salpetersäure, wenn möglich, vollständig durch Ammonium neutralisiert ist. Ich denke mir also, dass in der Atmosphäre NH_4 , OH und NH_4NO_3 vorkommen. Die im Regenwasser gefundenen Mengen von diesen Stoffen entsprechen nicht im allgemeinen der wirklichen Konzentration der beiden Stoffe. Bezeichnen wir die Konzentrationen der beiden Stoffe mit x und y und die gefundenen Werte mit p und q , wo x und p sich auf Ammonium, die anderen Bezeichnungen auf Ammoniumnitrat beziehen, findet man leicht, dass folgende Gleichung² gilt:

$$y = \frac{q \cdot x}{x - p}$$

Ich wende Milligrammoleküle an. Von jedem Stoff erniedrigt eine gleich grosse Anzahl Moleküle die Dampfspannung gleich viel. Es ist wahrscheinlich, dass in demselben Regen jeder Tropfen entweder nur Ammonium oder Ammoniumnitrat enthält, aber dass zwei Tropfen, von denen der eine Ammonium und der andere Ammoniumnitrat enthält, beide dieselbe Anzahl Moleküle enthalten. Es ist also berechtigt $x = y$ zu setzen unter der Voraussetzung, dass p und q Milligrammoleküle bedeuten. Man erhält dann

$$x = y = p + q$$

In der zitierten Arbeit ist die Menge Stickstoff, die in Ammonium und Salpetersäure gebunden ist, verschieden angegeben, weshalb die Rechnung sehr einfach wird. Die Voraussetzungen gelten nur approximativ, teils weil Regen analysiert ist, der während vieler Tage gefallen ist, teils weil eine vollständige Neutralisierung der Salpetersäure nicht ganz sicher gestellt ist und teils weil nicht ausgeschlossen ist, dass die grossen Regentropfen von verschiedenen Konzentrationen sein können. Die Ergebnisse können daher nicht sehr exakt werden.

¹) A. Petermann et J. Graftiau, Recherches sur la composition de l'atmosphère, Seconde partie, Mémoires Couronnes et autres mémoires publiés par l'Académie Royal des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, Tome 49, Bruxelles 1896.

²) Wir nehmen an, dass X Liter Wasser mit Ammonium und Y Liter mit Ammoniumnitrat fallen. Da wird

$$p = x \cdot X \quad q = y \cdot Y \quad (X = 1 - Y)$$

Daraus erhält man

$$p = x - xY \quad \text{und} \quad q = yY$$

und schliesslich

$$y = \frac{qx}{x - p}$$

Ich setzte eine sehr grosse Genauigkeit der Analysen voraus und berechnete so Mittelwerte aus Analysen, die sich nur wenig von einander unterschieden. Dadurch erhielt ich eine recht grosse Menge von Werten, die anscheinend vollständig unregelmässig verteilt aussahen. Mit diesen Mittelwerten wurde in folgender Weise verfahren. Von den wenigen sehr grossen Werten ausgehend untersuchte ich, ob man unter den anderen Mittelwerten Werte finden konnte, die durch Division mit 2 oder Potenzen von 2 aus den grossen Werten gebildet werden konnten. In dieser Weise verfahren, erhielt ich eine vollständige Serie und 2 unvollständige. Sämtliche sind in der Tabelle 11 in Grammolekülen angegeben.

Tabelle 11.

1. $17.86 \cdot 10^{-6}$, $35.43 \cdot 10^{-6}$ (8): $72.07 \cdot 10^{-6}$ (30): $144.07 \cdot 10^{-6}$ (15): $283.36 \cdot 10^{-6}$ (3): $562.86 \cdot 10^{-6}$ (1).
2. $56.21 \cdot 10^{-6}$ (31): $110.07 \cdot 10^{-6}$ (21): $231.43 \cdot 10^{-6}$ (1).
3. $44.50 \cdot 10^{-6}$ (8): $89.14 \cdot 10^{-6}$ (16): $179.43 \cdot 10^{-6}$ (5): $346.43 \cdot 10^{-6}$ (1).

Die Zahlen in Parenthese bedeutend, dass der Wert durch Mittelbildung aus dieser Anzahl Bestimmungen erhalten ist.

Durch Multiplikation dieser Werte mit dem Molekulargewichte des Ammoniums erhält man die Konzentration von Ammonium in Gramm ausgedrückt. Durch Multiplikation mit dem Molekulargewicht des Ammoniumnitrates erhält man die Konzentration von diesem Salze. Es zeigt sich aus dieser kleinen Rechnung, dass die Verhältnisse für Stickstoff mehr kompliziert ist als für die Meeressalze. Man kann nicht mit Sicherheit schliessen, dass auch die hier behandelten Stoffe wie die Meeressalze in der Atmosphäre verteilt sind. Der Umstand, dass drei Serien hier erhalten wurden, kann natürlich darauf beruhen, dass ich eine zu grosse Genauigkeit der Analysen vorausgesetzt habe. Die strenge Genauigkeit hielt ich für notwendig, um ein persönliches Moment in der Rechnung zu vermeiden. Die drei Serien können indessen auch einen anderen Grund haben. Da Ammoniak ein Gas ist, kann man sich denken, dass dieser Gas an andere Partikelschen adhärirt, z. B. an Meeressalzpartikel oder andere.

Die Andeutung an Gruppenverteilung ist hinreichend gross, um zu weiteren Untersuchungen direkt im Nebel oder in den Wolken unter gleichzeitiger Messung der Tröpfchengrösse anzuregen. Im Regen, glaube ich, muss man immer Abweichungen finden.

Wenn man annimmt, dass die Kondensationskerne, die aus Ammonium oder Ammoniumnitrat bestehen, in Analogie mit den Meeressalzen in der Atmosphäre verteilt sind, so muss diese Verteilung durch $2^n \cdot M$ ausgedrückt werden können, wo M das Gewicht eines Moleküls ist. Unter dieser Voraussetzung und unter Annahme der Konzentrationen, die der Tabelle 11 entsprechen, müssen die Tröpfchenradien beziehungsweise

$$1. 2^{\frac{n}{8}} \cdot 7.2 \cdot 10^{-4}, 2. 2^{\frac{n}{8}} \cdot 7.7 \cdot 10^{-4}, 3. 2^{\frac{n}{8}} \cdot 6.7 \cdot 10^{-4}$$

gleich sein.

Im Lehrbuch von Hann-Süring finden sich S. 309 einige Angaben über Ammoniakmengen im Regenwasser. Der Gehalt an Ammoniak ist im Winter grösser als im Sommer. Nach meiner Ansicht beruht dies darauf, dass Ammoniak sicherlich unterkühlte Tröpfchen bilden kann und daher eine grosse Rolle in der Schnee- und Eiseisbildung spielt, und dass eine sehr grosse Anzahl anderer Kerne im Sommer vorkommt, die Kerne für Regen-

¹⁾ Unter Voraussetzung gleicher Molekülarkonzentration liegt in dieser Annahme auch, dass die Tröpfchen bei grosser Verdünnung gleich gross sind. Man findet diese Tatsache unmittelbar durch leichte Betrachtungen.

tropfen sind. Also beruht die grössere Menge $\text{NH}_4 \cdot \text{OH}$ im Winter nicht darauf, dass die Atmosphäre in dieser Jahreszeit mehr Ammonium enthält. Davon wissen wir nichts. Gewisse Umstände sprechen dafür, dass das Umgekehrte der Fall ist. In hohen südlichen Breiten hat man einen geringeren Ammoniumgehalt gefunden als in Mitteleuropa. Vielleicht kann man dies Verhältnis auf hohe nördliche Breiten ausdehnen.

Je konzentrierter eine Lösung ist, desto kleiner ist ihre Kristallisationsgeschwindigkeit (S. 51). Wenn man annehmen darf, dass die Ammoniummenge im Norden ebenso klein wie im Süden ist, muss sie hier im Winter sehr klein sein. Die Tröpfchen kristallisieren da leichter. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass die Tröpfchen mit Ammonium oder Ammoniumnitrat rasch in Schnee verwandelt werden und daher an der Nebelfrostbildung hier seltener teilnehmen. Es bestehen auch Gründe anzunehmen, dass die Geschwindigkeit des Zusammenfließens von den Kondensationskernen abhängig ist. Tröpfchen aus Meeressalzen fließen nicht sehr leicht zusammen. Dies steht sicherlich im Zusammenhange mit der elektrischen Ladung, die ich hier auch nicht behandeln will.

Über die Salzverteilung. — Uns ist in dieser Darlegung ein Verhältnis begegnet, das geeignet ist, die Aufmerksamkeit stark zu erregen. Mit Sicherheit hat es sich gezeigt, dass die kleinen Salzpartikelchen, die aus dem Meere stammen, so verteilt in der Atmosphäre vorkommen, dass ihre Masse immer gleich $2^n \cdot m$ ist, wenn m die Summe der Massen der Atome in den Meeressalzen ist, indem nur ein Atom Brom mitgenommen wird. Für die hier behandelten Stickstoffverbindungen erhielt man Verhältnisse, die auf eine analoge Verteilung deuten. Dies muss indessen näher untersucht werden. Es liegen hier Verhältnisse vor, die dafür sprechen, dass ungeordnete (?) starke Kräfte, die zerteilend auf die Materie wirken, sie immer im Verhältnis $2^n \cdot m$ zerteilen. Wie weitgehend dieser Satz ist, kann erst die Zukunft zeigen. Wenn ein homogener Körper — ohne Risse u. d. — gewaltsam gesprengt wird, darf man, falls der Satz generell ist, immer Teile erhalten, deren Massen sich zueinander wie 2^n oder deren Radien, wenn die Teile sphärisch sind, wie $2^{\frac{n}{3}}$ verhalten. (Als ein Kuriosum sei erwähnt, dass die Radien der Planetoiden Ceres, Vesta, Pallas, Juno — die einzigen Planetoiden, deren Radien ich kenne — sich zueinander wie $2^{\pm \frac{n}{3}}$ verhalten).

Unter allen Umständen zeigen meine Untersuchungen, dass die Turbulenz der Atmosphäre molekularer Natur ist. Vom physikalischen Standpunkte an werde ich diese Verteilung später behandeln.

Die Untersuchungen Defants. — Schon im Jahre 1905 hat A. Defant¹ im Regen eine regelmässige Verteilung der Tröpfchengrösse entdeckt. Er fand bei seinen ersten Messungen Häufigkeitsmaxima bei folgenden Grössen, die das Gewicht der Tröpfchen in mg ausdrücken:²

0.11, 0.23, 0.46, 0.92, 1.84, 3.68 mg. mit Radien in der

Serie $2^{\frac{n}{3}} \cdot 7.48 \cdot 10^{-4}$ cm.

0.35, 0.69, 1.38, 2.76 mg. mit Radien in der

Serie $2^{\frac{n}{3}} \cdot 6.80 \cdot 10^{-4}$ cm.

¹ A. Defant, Über Gesetzmässigkeiten in der Verteilung der verschiedenen Tropfengrössen bei Regenfällen, Wiener Sitzungsab. Math. naturwissenschaftl. Klasse, 1905 S. 585, oder Met. Zeitschr. 1905, S. 321, wo ich seine Ergebnisse gelesen habe. Aug. Becker, Zur Messung der Tropfengrössen bei Regenfällen nach der Absorbtiionsmethode, Met. Zeitschr. 1907, S. 247, kritisiert meiner Meinung nach vollkommen unberechtigt die Ergebnisse Defants, aber gibt daneben eine sehr gute Darlegung über die Genauigkeit der Absorbtiionsmethode (Tabelle 6, S. 261).

²) Die Radien sind von mir ausgerechnet und die Gruppeneinteilung von mir vorgenommen.

Später fand er folgende Serie

0.14, 0.28, 0.56, 1.12, 2.24 mg. mit Radien in der Serie $7.98 \cdot 10^{-4}$.

Daneben hat er die Gewichte 1.45 und 1.85 mg. gefunden.

Die letzte Serie ist sehr nahe eine 8-Gruppe. Die zweite Tröpfchengruppe ist von derselben Grössenordnung wie der von mir aus dem Ammoniumgehalt berechnete zweite Wert (S. 47). Vielleicht konnte man geneigt sein zu vermuten, dass diese Gruppe aus einem Ammoniumkern entwickelt ist. Indessen muss man äusserst vorsichtig bei Schlüssen in dieser Hinsicht sein. Von grösserer Bedeutung ist, dass Defant in Wien eine reine 8-Gruppe gefunden hat. Dies deutet darauf hin, dass diese Gruppe aus einem sehr weit ausgebreiteten Kern entwickelt ist, und es wäre von ausserordentlich grosser Bedeutung durch systematische Zusammenarbeit zwischen Forschern auf verschiedenen Orten diesem Kerne nachzuforschen. Gewisse Umstände deuten darauf, dass dieser Kern trotz der drei früher aufgeschriebenen Serien ein Ammoniumkern ist. Ich bin nicht sicher, dass die von Defant angewandte Absorbtionsmethode so genau ist, dass man sie für Schlüsse in dieser Hinsicht anwenden kann, wenn man auch sicherlich behaupten kann, dass seine Nachweisung der Häufigkeitsmaxima für gewisse Grössen vollständig unwiderlegbar ist.

Schlussworte.

Seite 11 wurde die Tröpfchenbildung bei verschiedenen α^3 dargelegt. Aus dieser Darlegung folgt, dass in einer Wolke allerdings Tröpfchen mit verschiedenen α^3 existieren, zugleich aber, dass Tröpfchen mit gleich grossen α^3 gleichzeitig die Grösse erreichen, wo das Zusammenfliessen anfangen kann. Dies erklärt, warum nur gleich grosse Tröpfchen, auch wenn sie kolloidisch klein sind, zusammenfliessen, was natürlicherweise jedem beliebigen Kondensationskerne gilt. Haben die Tröpfchen eine derartige Grösse erreicht, dass sie eine merkbare Fallgeschwindigkeit besitzen, attrahieren gleich grosse Tröpfchen einander.¹ Alle diese Umstände zusammen bewirken, dass man in der Atmosphäre schichtweise gleich grosse Tröpfchen erhält, oder dass man in der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bei verschiedenen Gelegenheiten zwar verschieden grosse Tröpfchen findet, aber in einer Wolke oft Tröpfchen nur einer einzigen Grösse.

Hierdurch ist ein Teil des Kondensationsproblems prinzipiell gelöst, wenn auch viele Einzelheiten noch der künftigen Forschung offen stehen. So z. B. gilt es die Grösse zu finden, wo die Tröpfchen im allgemeinen anfangen zusammenzufließen. Diese Grösse ist sicherlich bei gewissen speziellen Gelegenheiten verschieden, jedoch bei gewöhnlicher Wetterlage nahezu immer gleich gross. Für das Verstehen des Gewitters ist es wichtig zu betonen, dass das Zusammenfliessen von sehr kleinen Tröpfchen wahrscheinlich sehr hohe Potentialgefälle hervorrufen kann.

¹) W. Schmidt, Met. Z. 1. c.

²) Hilding Köhler, Über die Tröpfchengrösse und die Kondensation, Met. Z. 1921, S. 359.

Note 1.

In jeder Wolke und in jedem Nebel findet man immer verschiedene Tröpfchengrößen. Immer überwiegt eine bestimmte Grösse. Über 0° ist die Verschiedenheit sehr gross; es ist da nicht ungewöhnlich Radien zu finden, die sich sogar zu einander wie $\frac{1}{10}$ verhalten.

Unter 0° ist der Radius unter denselben Umständen konstanter. Man kann lange Serien von Messungen anführen, die nur Abweichungen im Gebiete der Messungsfehler haben. Dies gilt sowohl den optischen als den mikroskopischen Messungen, also sowohl der Messung der einzelnen Tröpfchen als der Messung einer grösseren Anzahl. Bei gewissen Gelegenheiten schwankt die Grösse der Radien auch unter 0° sehr bedeutend, aber die Schwankung ist dann regelmässig.

Die grosse Schwankung der Radiengrösse im Sommer wurde dem Umstande zugeschrieben, dass man in dieser Jahreszeit sehr viele Arten von Kondensationskernen erwarten kann. Daher ist es auch wahrscheinlich, dass man in anderen Zonen als in der MgNa-Zone oder vielleicht an der Grenze der MgNa-Zone eine sehr grosse Variabilität der Tröpfchenradien erhält, und nur schwierig die Gruppen unterscheiden kann.

Dass die Tröpfchengrösse im Winter konstanter ist, folgt als Korollarium meiner früheren Darlegung. Die Meeressalze überwiegen als Kondensationskerne. Dazu kommt auch, dass das Zusammenfliessen ruhig vorgehen muss, weil andernfalls die Wolke in Schnee verwandelt wird.

Die Wolken und die Nebel sind oft in Schichten geteilt. Diese Schichten sind durch zuweilen unmerklich dünne, zuweilen recht breite Zonen mit unsichtbaren oder nur wenig sichtbaren Tröpfchen von einander getrennt. Diese Schichten enthalten oft verschiedene Tröpfchengrößen, die jedoch zu derselben Gruppe gehören können. Man versteht daraus, dass das Zusammenfliessen in verschiedenen Schichten wahrscheinlich verschieden vorgeschritten ist.

Im Winter bei sehr dichtem Nebel hat die Konzentration im allgemeinen die kleinsten Werte. Nach der Tabelle 8 ist also in diesem Falle α^3 klein.

Die kleinen α^3 habe ich hauptsächlich bei östlichen Winden beobachtet, die grössten α^3 nur bei westlichen. Daraus folgt, dass die Luft von W, die freilich über ein Gebirgsland von ca. 30 km. gestrichen ist, nicht die hier gefundenen grössten α^3 verloren hat. Östliche Winde dagegen, die Landwinde sind, haben die grösseren α^3 vollständig verloren oder — was stark betont sein muss — die α^3 können in der Luft zerlegt werden sein. Die gewöhnlichsten α^3 von E sind $9.325 \cdot 10^{-1}$. Diese Grösse spielt daher eine wesentliche Rolle für die Kondensation.

In meiner ersten Mitteilung wurden die kleinsten von mir gefundenen Tröpfchen als Grenztröpfchen bezeichnet. In der Tat ist wahrscheinlich ein Teil der kleinen Tröpfchen als wirkliche Grenztröpfchen zu bezeichnen. Vielleicht beruhen die Unregelmässigkeiten, die man erhält, wenn die Werte der Radien genau angegeben werden, darauf, dass Grenztröpfchen darin vorkommen. Wie man aus meiner früheren Darlegung (S. 12) sehen kann, gibt es eine ausserordentlich kleine Verschiedenheit in den Dampfspannungen der Grenztröpfchen und denjenigen der Tröpfchen meiner Konzentrationen. Es ist daher nicht immer leicht zu beurteilen, welche Tröpfchen Grenztröpfchen sind und welche nicht. In Fig. 15 sieht man indessen für Tröpfchen mit einem Radius zwischen $3 \cdot 10^{-4}$ und $3.4 \cdot 10^{-4}$ eine Gerade parallel der Abscisse. Ein Teil von diesen Tröpfchen sind meiner Meinung nach Grenztröpfchen. Ich habe nämlich oft gefunden, dass diese Tröpfchen auftreten, wenn sich eine Wolke auflöst. Es trifft dabei ein, dass ihre Anzahl nicht so gross ist, dass man die Wolke ohne weiteres sieht. Wird das direkte Licht vom Auge abgeblendet, kann man sehen, wie sich die Tröpfchensammlungen cumu-

lusartig in der Luft wälzen. Andererseits muss man sehr vorsichtig sein, alle Kränze als in Wolken gebildet anzusehen. Man kann nämlich bei vollständig klarem Wetter Kränze z. B. rings um den Mond sehen. Schiebt man im letztgenannten Falle eine Scheibe mit demselben Winkeldurchmesser wie dem des Mondes vor das Auge, so kann es eintreffen, dass die Kränze verschwinden. In der Tat ist dies ein Zeichen davon, dass die Kränze sehr nahe am Auge entstanden sind. Dies Phänomen habe ich sehr oft gesehen, und zwar erstaunte es mich anfangs, weil die Kränze immer gleich gross waren. Ein zweiter Grund meiner Annahme, dass die kleinen hier erwähnten Tröpfchen Grenztröpfchen sind, liegt darin, dass ich nahe am Boden »im Hof« diese Grösse zuweilen in überwiegender Anzahl mikroskopisch gefunden habe.

Man kann, was ich früher nicht betont habe, die Tröpfchen in der Grenze einer Wolke nicht immer als Grenztröpfchen in meinem Sinne betrachten. Es ist natürlich so, dass die Tröpfchen im Inneren der Wolke leichter zusammenfliessen und dadurch wachsen. Die Grenztröpfchen können so klein sein, dass sie unsichtbar sind. Die Grenztröpfchen der gewöhnlichsten Konzentration (α^3) sind von $7 \cdot 10^{-4}$ cm. schon $1 \cdot 10^{-4}$ cm. Wenn man Radien von $7 \cdot 10^{-4}$ cm. in der äusseren Schicht einer Wolke findet, darf man erwarten, die Grenztröpfchen weiter entfernt von der Wolke zu finden, es ist aber andererseits nicht unmöglich, dass die sichtbaren gemessenen Tröpfchen Grenztröpfchen sind. Um dies zu beurteilen muss man die Grösse im Inneren gemessen haben.

Note 2.

Für das Verständnis der Nebelfrostablagerungen haben die in diesen Mitteilungen angeführten Ergebnisse eine grosse Bedeutung. Meine ersten Studien auf dem Pärtetjåkko ermöglichten mir diese Ablagerungen in drei — anstatt früher zwei — verschiedene Arten zu zerlegen. Diese Einteilung muss ich meinen späteren Erfahrungen gemäss als die zweckmässigste beibehalten. Ausserdem bin ich imstande die Entstehungsweise der Ablagerung schärfer zu definieren.

Erstens zeigen die Darlegungen, dass Nebelfrost hauptsächlich durch die Anlagerung von unterkühlten Tröpfchen gebildet ist, was schon früher als wahrscheinlich betrachtet wurde. Aus meinen Ergebnissen geht indessen mit grösserer Sicherheit hervor, dass die Sublimation für die Bildung von Rauh frost und Rauheis von vorschwindender Bedeutung ist. Dies zeigt die Regelmässigkeit der Konzentration.

Wenn eine unterkühlte Flüssigkeit gefriert, geschieht dies mit verschiedenen Geschwindigkeiten je nach dem Grade der Unterkühlung. Die Stabilität einer unterkühlten Flüssigkeit beruht auf ihrer Kernzahl. Diesen Begriff scheint *Tammann* eingeführt zu haben, und er definiert ihn in folgender Weise:¹⁾ »Die Anzahl der in der Einheit des Volums während der Zeiteinheit sich bildenden Kristallisationscentren misst das spontane Kristallisationsvermögen. Diese Zahl wollen wir die Kernzahl (K-Z.) nennen«. Ist diese Zahl gross, ist eine unterkühlte Flüssigkeit schwer zu erhalten. Tatsächlich beruht die Stabilität indessen auch auf der Oberflächengestalt der Flüssigkeit. Wie bekannt, ist z. B. Wasser in Kapillarröhren leicht sehr weit zu unterkühlen. Dies Verhältnis erklärt, wie früher erwähnt, dass Tröpfchen auch bei sehr niedriger Temperatur in der Luft existieren können. Ihre Bildung beruht auf löslichen Stoffen. Wird das Tröpfchen deformiert durch Zusammenstossen mit einem festen Gegenstande, gefriert es und die

¹⁾ *Gustav Tammann*, Lehrbuch der Metallographie, Leipzig 1921, S. 4.

Tröpfchen nehmen eine Kristalllage ein. Dies ist indessen oft schwer zu beobachten, weil die Oberflächengestalt dadurch nicht notwendigerweise in hohem Grade verändert wird. In durchgehendem Lichte kann man es indessen oft sehen. Nach längerer oder kürzerer Zeit tritt vollständige Kristallisation ein (S. 23). Kommen Verunreinigungen vor, ist die Kristallisationsgeschwindigkeit nach Tammann langsamer. Dies stimmt vollkommen mit meinen Untersuchungen über Nebelfrost überein. Ist die Verunreinigung — ich halte mich hier an die Salzmenge — gross, entsteht durch Ausfliessen der Tröpfchen oft Rauheis. Die Kristallisationsgeschwindigkeit ist nicht hinreichend gross, um das Ausfliessen zu verhindern. Die Kristallisationsgeschwindigkeit ist indessen nicht nur von Salzkonzentration sondern auch von der Temperatur abhängig. Ich will die Kristallisationsgeschwindigkeit X nennen, und setze $X = F(a_1 t)$. a gibt die Konzentration nach meiner früheren Darlegung an, t ist die Temperatur, die natürlich immer negativ ist. Dann formuliere ich kurz folgende Sätze:

Ist $F(a_1 t) < A$, entsteht Rauheis.

Ist $A < F(a_1 t) < B$, entsteht Rauhrost.

Ist $F(a_1 t) > B$, entsteht Rauhreif. (?)

Die Formel für Rauhreif ist analogisch den anderen gebildet. Ich habe diese Bildung nicht so genau untersucht, dass ich mit Sicherheit behaupten könnte, dass die Formel dafür gilt. Ich glaube jetzt, dass Sublimation bei der Rauhreifbildung wirksam ist.

Die Grössen A und B kann ich noch nicht exakt angeben. Hat man einmal die Funktion $F(a_1 t)$ bestimmt, so kann man auch die Schneebildung viel exakter darlegen, als ich es jetzt gekonnt habe. Findet man — was ich nicht getan habe — dass die Salzkonzentration im Schnee durch Multiplikation mit $2^{\pm n}$ auf eine gewisse Grösse reduziert werden kann, spielt wahrscheinlich auch bei der Schneebildung die Sublimation eine verschwindende Rolle. In diesem Falle müssen meines Erachtens die Tröpfchen in rascher Folge zusammenprallen. Dies findet sicherlich in sehr turbulenter Luft statt. Ich glaube jedoch nicht, dass man es nun als eine generelle Regel ansehen kann. Viele sehr eingehende Untersuchungen müssen indessen auf dies Problem gerichtet werden, weil es von grosser Bedeutung ist. Schon hier sei bemerkt, dass bei der Tröpfchenbildung, die gut ausgebildete Schneesterne abgibt, andere lösliche Stoffe als die Meeressalze eine Rolle spielen. Da man jetzt weiss, dass die unterkühlten Tröpfchen eine wesentliche Rolle in der Schneebildung spielen, ist der Weg einer solchen Untersuchung angewiesen.

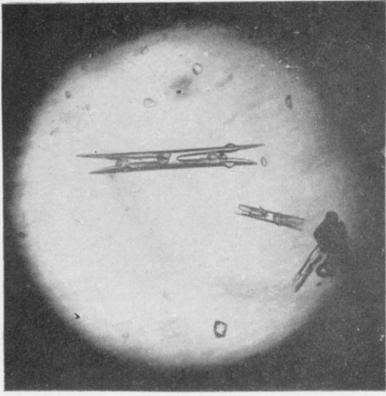
Hier will ich vorläufig einige Ergebnisse erwähnen, die die konzentrierte Formel-darstellung allgemein verständlich macht.

Es hat sich gezeigt, dass Rauheis bei sehr niedrigen Temperaturen nur selten abgelagert wird. Bei einer bestimmten Temperatur, z. B. -8° , kann sowohl Rauhrost als Rauheis abgelagert werden. Es zeigt sich indessen, dass Rauheis dann grössere Salzkonzentration aufweist als Rauhrost. (Es können Ausnahmen vorkommen. Wenn die Tröpfchen sehr schnell zu einer beträchtlichen Grösse gewachsen sind, erhält man Rauheis. Dies kommt indessen nach meiner Erfahrung nur in der Nähe von 0° vor). Meiner früheren Darlegung gemäss ist in diesem Falle α^3 bei der Rauheisablagerung grösser gewesen als bei der Rauhrostablagerung. Bei niedriger Temperatur ist der Rauhrost bei demselben α^3 -Wert dem Aussehen nach mehr kristallinisch als bei hoher Temperatur. Dies beruht darauf, dass die Kristallisationsgeschwindigkeit bei niedriger Temperatur grösser ist. Bei sehr kleiner α^3 wird auch bei relativ hoher Temperatur Rauhrost dem Aussehen nach mehr kristallinisch als der Fall ist, wenn α^3 grösser ist. Wegen der Gesetzmässigkeit der Ergebnisse der Cl-Analysen kann dies Verhältnis nicht darauf beruhen, dass Sublimation stattgefunden hat. Dies dürfte hinreichend sein, um die Formeln hier zu erklären.

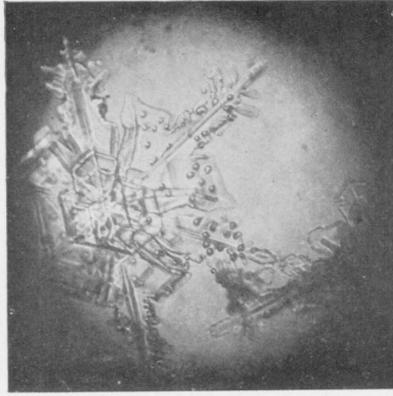
Dankbar hebe ich hervor, dass sowohl der norwegische Staat als die Geophysische Kommission Norwegens, ersterer durch spezielle staatliche Bewilligung, letztere durch eine Bewilligung aus dem sogen. Birkelandsfond, mich für die weitere Untersuchung der rückständigen Probleme ausgerüstet haben. Ganz besonderen Dank schulde ich dem Herrn Direktor *Krogness* am Geophysischen Institut Tromsö — ebenfalls Mitglied der Geophysischen Kommission — für sein nie aufhörendes Interesse und unermüdliches Bestreben, mir die Herausgabe meiner Arbeiten zu erleichtern.

Die Assistenten des Observatoriums, die Herren *H. Devold*, *S. Evjen* und *O. Andersen*, sind mir in verschiedener Weise behilflich gewesen. Ersterer hat numerische Berechnungen ausgeführt und die hier reproduzierten Kurven mit Tusche aufgezogen, sämtliche sind mir während meiner Gebirgsreisen tüchtige Begleiter gewesen.

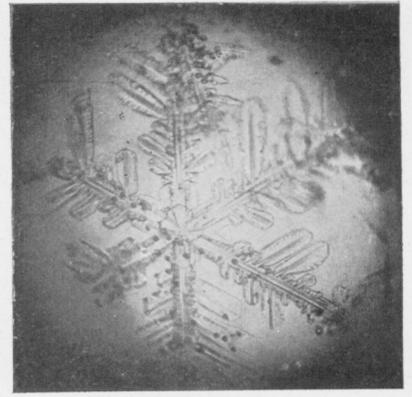
Halde im April 1921.



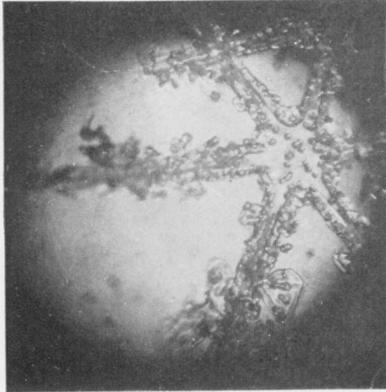
1



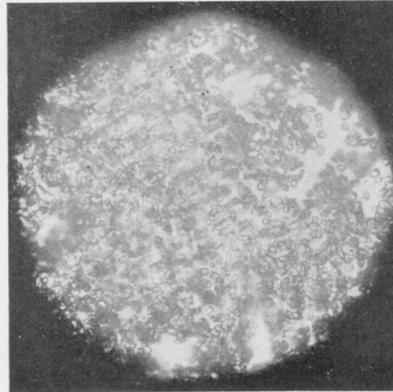
2



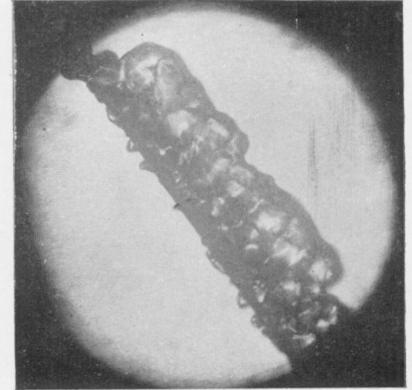
3



4



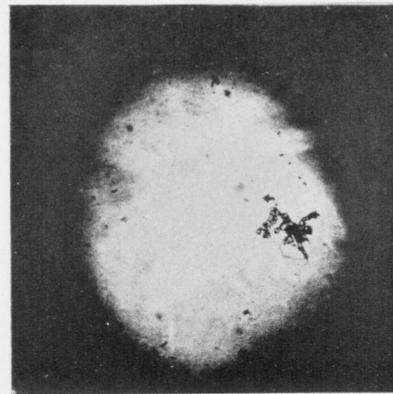
5



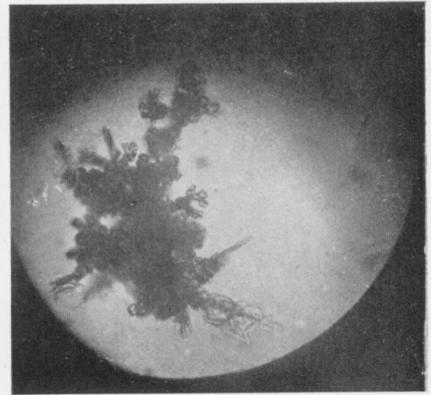
6



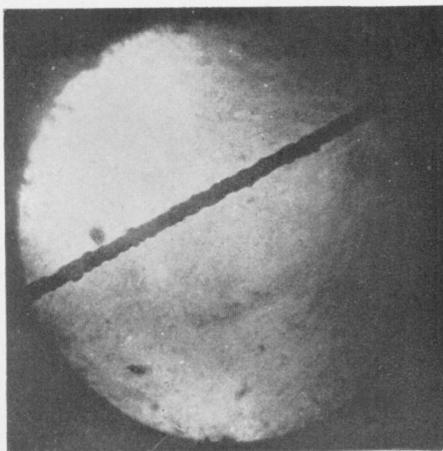
7



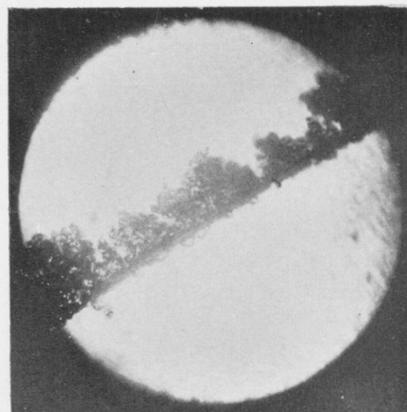
8



9



10



11