

ZUR KONDENSATION DES WASSERDAMPFES IN DER ATMOSPHERE

ERSTE MITTEILUNG

VON

HILDING KÖHLER

(Manuskript eingeliefert 12. März 1921).

Das Kondensationsproblem des Wasserdampfes in der Atmosphäre ist noch ungelöst. So spät wie 1914 glaubte *Lodge*, dass man durch Zuführung negativer Elektrizität in die Luft Regen und umgekehrt durch Zuführung positiver Elektrizität Schönwetter hervorrufen könne. *Hann* und *Süring* drücken in ihrem Lehrbuch der Meteorologie ihre Auffassung folgendermassen aus: »Doch ist die Wirkung der Gasionen als Kondensationskerne wohl überschätzt worden (Lenard, Wegener) und *Aitkens* Ablehnung derselben nicht völlig unberechtigt gewesen.« *Lodge* glaubte also 1914 unbedingt, dass die Gasionen als Kondensationskerne in der Atmosphäre auftreten, die letzten Autoren lehnen freilich diese Theorie nicht ab, halten sie indessen für überschätzt. Überhaupt ist man, so viel ich weiss, in Deutschland geneigt an den Aitkenschen Standpunkt zurückzukehren. Dies ist auch natürlich, da man die Hypothese von einer hohen Übersättigung in der Atmosphäre einführen muss, wenn die negativen Ionen als Kondensationskerne angenommen werden. Eine grössere Übersättigung findet in der Atmosphäre wenigstens äusserst selten statt, wenn sie überhaupt vorkommt. (»Frostübersättigung« nach *A. Wegener* ausgenommen, die sehr gewöhnlich ist). Selbst habe ich etwa 4000 Messungen in 1850 und 900 m. Seehöhe ausgeführt. Von diesen mögen etwa vier oder fünf Übersättigung gezeigt haben, was doch sehr unsicher ist.

Die grosse Seltenheit der Übersättigung in Verbindung mit der Tatsache, dass z. B. Regen ebenso oft positiv wie negativ geladen ist¹, nötigt uns andere Kondensationskerne als die negativen Ionen zu suchen. Seit mehreren Jahren bin ich mit dem Kondensationsproblem beschäftigt, und ich beabsichtige, mit diesem Aufsatz einige Ergebnisse vorläufig zu veröffentlichen, warum ich auf genauere geschichtliche Entwicklung verzichten muss.

Mein Streben zielte teilweise dahin die wirklich vorhandenen Kondensationskerne zu finden. Solche Kerne hat man schon früher oft gefunden, z. B. durch Aitkens Staubzähler, durch Analysieren von Regenwasser oder auch direkt. Durch Aitkens Staubzähler kann man diese Kerne nicht näher charakterisieren, man kann nicht ohne weiteres behaupten, dass die Bestandteile des Regenwassers Kondensationskerne sind. Die fallenden Regentropfen können sehr wohl in niedrigerem Niveau den grössten Teil dieser Bestand-

¹ Nebelfrostablagernde Wolken sind immer positiv oder neutral. Dieses Verhältnis wird hier unberücksichtigt, wird aber später behandelt.

teile aufgesammelt haben. Die direkte Bestimmungen sind zu gering an Zahl um sichere Schlüsse zuzulassen. Ich suchte daher die Kerne direkt in den Wolken. Wie bekannt scheidet sich aus diesen auf den Gebirgen grosse Ablagerungen aus. Diese Ablagerungen¹ bestehen zum grössten Teil aus Nebelpartikelchen. Durch Analyse dieser Ablagerungen unmittelbar nach ihrem Absetzen, ist man imstande die in den Wolken befindlichen Kerne zu finden.

Es liegt auf der Hand, dass man in den Wolken Chloride finden muss. Wenn das Meer von Winden gepeitscht wird, wird von der Meeresoberfläche nicht unbedeutende Mengen von Wasser in die Luft emporgetrieben. Das Wasser verdunstet teilweise, und die Salze werden zum Teil sehr fein verteilt mit den Luftströmen in die Höhe getrieben. Dieser Umstand, in Verbindung mit der Tatsache, dass Natrium in der Atmosphäre äusserst gewöhnlich ist, macht es wahrscheinlich, dass die Verteilung der in der Atmosphäre befindlichen anorganischen Salze vollkommen dieselbe ist, wie in dem Oberflächenwasser des Meeres. Chlor nachzuweisen und zugleich quantitativ zu bestimmen ist verhältnismässig einfach. Hat man eine gewisse Menge Chlor im Nebelfrost gefunden, ist es nach dem oben gesagten berechtigt anzunehmen, dass in diesem Natrium und Magnesium prozentual ganz wie im Meere verteilt ist und das proportional dazu Magnesiumsulfat und Calciumsulfat auch vorkommen. Sicherlich ist die grösste Menge des Chlores mit Natrium verbunden. Für folgenden Berechnungen spielen die anderen Salze überhaupt keine Rolle. Dass sie vorhanden sind, ist nur in der Hinsicht von Bedeutung, dass die Magnesiumsalze und speziell $MgCl_2$ sehr hygroskopisch sind.

Meinen Analysen gemäss habe ich im Rauhrost einen sehr konstanten Chlorgehalt gefunden. Ich kann daher einen einzelnen Fall herausgreifen, der sich in gewissem Grade ebenfalls als ein »Grenzfall« zeigen wird.

Die Wolke, aus welcher sich der analysierte Nebelfrost abgesetzt hatte, wurde von mehreren Gesichtspunkten aus sorgfältig bestimmt. Erstens wurde unwiederlegbar bewiesen, dass die Nebelpartikelchen aus flüssigem Wasser bestanden. Die Grösse der Wolken-tröpfchen wurde sowohl optisch als mikroskopisch bestimmt. Das Wassergehalt der Wolke wurde dadurch gemessen, dass ein bestimmtes Quantum Luft mittelst eines Gefässes abge-sondert wurde und dann ein trockner Luftstrom durch das Gefäss gesaugt und die Feuchtigkeit durch Phosphorpentoxyd aufgesammelt. Die Menge flüssigen Wassers per m^3 ist somit einfach zu berechnen, da man sowohl den Dampfdruck als die Temperatur kennt. Die Temperatur war $-9^\circ.0$, und die Luft war mit Wasserdampf gesättigt.

Ich fand durch die Analyse 0.00357 gr. Cl per Liter Wasser, eine Menge, die wie schon gesagt, beinahe immer im Rauhrost gefunden wird. Gesetzt dass diese Chlormenge in derselben Weise wie im Meere verteilt ist und dass dazu $MgSO_4$ und $CaSO_4$ vorkommen, muss die Verteilung der Salze per Liter die folgende sein:

NaCl	$5.03 \cdot 10^{-3}$ gr.	= $0.80 \cdot 10^{-4}$	Grammoleküle ²
MgCl ₂	$0.70 \cdot 10^{-3}$ »	= $0.07 \cdot 10^{-4}$	»
MgSO ₄	$0.47 \cdot 10^{-3}$ »	= $0.04 \cdot 10^{-4}$	»
CaSO ₄	$0.29 \cdot 10^{-3}$ »	= $0.02 \cdot 10^{-4}$	»

Der Radius der Tröpfchen war bei dieser Ablagerung $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. Die Wolke war ganz ungewöhnlich dicht und enthielt die bei dieser Temperatur höchst ungewöhnliche

¹ Ich muss für die Terminologie im Folgenden auf *Hilding Köhler*: Studien über die Nebelfrostab-lagerungen auf dem Pärtetjåkkö hinweisen.

² Über die Verteilung der Salze siehe: *Krümmel*, Handbuch der Oceanographie 2. Aufl. 1907 Bd. 1 S. 218. Andere Salze werden nicht berücksichtigt.

Menge von 7.9 gr. flüssiges Wasser per m^3 Luft. Per m^3 Luft waren also die Salz-
mengen, wenn man sie als regelmässig verteilt betrachten darf, die folgenden:

NaCl	$4.0 \cdot 10^{-5}$	gr.
MgCl ₂	$0.6 \cdot 10^{-5}$	»
MgSO ₄	$0.4 \cdot 10^{-5}$	»
CaSO ₄	$0.2 \cdot 10^{-5}$	»

Ich nehme vorläufig an — die Annahme wird später geprüft — dass die Verteilung dieser Salz-
mengen vollkommen regelmässig ist, so dass gleich viel auf jedes Tröpfchen
kommt. Das Wassertröpfchen hatte einen Radius von $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. In jedem Tröpfchen
war also $9.18 \cdot 10^{-14}$ gr. von den obengenannten Salzen. Der Radius eines solchen Par-
tikelchen ist etwas über 10^{-5} cm. Die gefundene NaCl-Menge ist sehr nahe $N/10000$
($N =$ die Normallösung). In Betracht, dass auch andere Salze zugegen sind, können wir
ohne Weiteres mit dieser Konzentration rechnen.

Wie bekannt erniedrigt ein in Wasser gelöster Körper den Dampfdruck, die sphäri-
sche Form der Tröpfchen erhöht denselben. Die Erhöhung des Druckes durch die kapil-
lären Kräfte kann man mit Hilfe folgender vereinfachten Formel¹ berechnen.

$$(1) \quad Dp_1 = \frac{P \cdot v' \cdot S}{v'' - v'}$$

$S =$ die Kapillaritätskonstante, $v' =$ das sp. Volumen des Wassers, $v'' =$ das sp. Vo-
lumen des Dampfes, $P =$ die Hauptkrümmung, im Falle sphärischer Form gleich $2/r$, $r =$
der Radius, $Dp_1 =$ die Dampfdruckerhöhung.

Die Erniedrigung des Druckes wird durch folgende Formel² berechnet:

$$(2) \quad Dp_2 = \frac{e \cdot m}{m + m'}$$

$m =$ die Anzahl Moleküle des gelösten Körpers, $m' =$ die Anzahl der Moleküle
des Wassers, $e =$ der Dampfdruck des Wassers, $Dp_2 =$ die Dampfdruckerniedrigung.

Diese Formel gilt für verdünnte Lösungen und wird hier für diese gebraucht.

Bei Berechnung der Dampfdruckerniedrigung durch diese Formel ist es notwendig,
um richtige Ergebnisse zu erhalten, den Dissoziationsgrad zu berücksichtigen. Ich habe
für die untenstehenden kleinen Tabellen angenommen, dass vollständige Dissoziation bis
zur $1/10$ Normallösung bestehe. Für $1/1$ Normallösung habe ich den Dissoziationsgrad zu
75 % gesetzt. Diese Annahmen können nicht sehr übertrieben sein, was aus Lehrbüchern
der theoretischen Chemie hervorgeht.

Wenn man jetzt annimmt, dass die Anzahl der Salzpartikelchen gleich derjenigen der
Tröpfchen ist, gibt uns

$$Dp_1 - Dp_2$$

einen Ausdruck für die Abweichung des Dampfdruckes über den Tröpfchen von dem
Dampfdruck über einer ebenen reinen Wasseroberfläche. Wird

$$(3) \quad Dp_1 - Dp_2 = 0,$$

¹ Voigt, Thermodynamik 2. S. 132.

² Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. Ich brauchte bei dieser Gelegenheit keine genauere
Formel.

so ist der Dampfdruck über dem Tröpfchen gleich dem über einer ebenen, reinen Wasseroberfläche. Aus dieser Gleichung kann man also für jede Konzentration bei einer bestimmten Temperatur den Radius berechnen, den das Tröpfchen in gesättigter Luft besitzen muss. Auf die Temperaturvariationen wird in diesem Zusammenhang keine Rücksicht genommen, da sie doch keine grössere Rolle spielen. In der endgültigen Arbeit wird diese Sache näher diskutiert. Bemerkte sei, dass sehr hohe oder sehr niedrige Temperaturen eine Reihe interessanter Resultate geben.

Die Gleichung (1) wird bei meinen Berechnungen noch weiter dadurch vereinfacht, dass v' gegen v'' vernachlässigt wird. Das spezifische Volumen v'' wird gleich $\frac{T \cdot 10^3}{0.2885 \cdot e'}$ gesetzt, wo T die absolute Temperatur und e' der wirklich vorhandene Druck ist. Die Gleichung (3) erhält man dann sehr leicht dadurch, dass man die Bedingung sucht, damit $e' = e$ sein soll.

Diese Betrachtungsweise mit den Vereinfachungen sind bei den von mir behandelten Konzentrationen zugelassen. Bei höheren Konzentrationen dagegen müssen andere Berechnungen vorgenommen werden. Die Gleichung (1) ist da, selbst in ihrer vollständigsten Form, kaum gültig.

Ich habe für einige Normallösungen die Tröpfchengrößen berechnet, die in gesättigter Luft bei jeder Lösung auftreten müssen, die also die Gleichung (3) befriedigen.

Tabelle 1

N · 1	$3.9 \cdot 10^{-6}$ cm.
N · 10^{-1}	$3.5 \cdot 10^{-5}$ »
N · 10^{-2}	$3.5 \cdot 10^{-4}$ »
N · 10^{-3}	$3.5 \cdot 10^{-3}$ »
N · 10^{-4}	$3.5 \cdot 10^{-2}$ »

Tabelle 2

N · 1	$9.5 \cdot 10^{-5}$ cm.
N · 10^{-1}	$1.5 \cdot 10^{-4}$ »
N · 10^{-2}	$3.4 \cdot 10^{-4}$ »
N · 10^{-3}	$7.0 \cdot 10^{-4}$ »
N · 10^{-4}	$1.5 \cdot 10^{-3}$ »

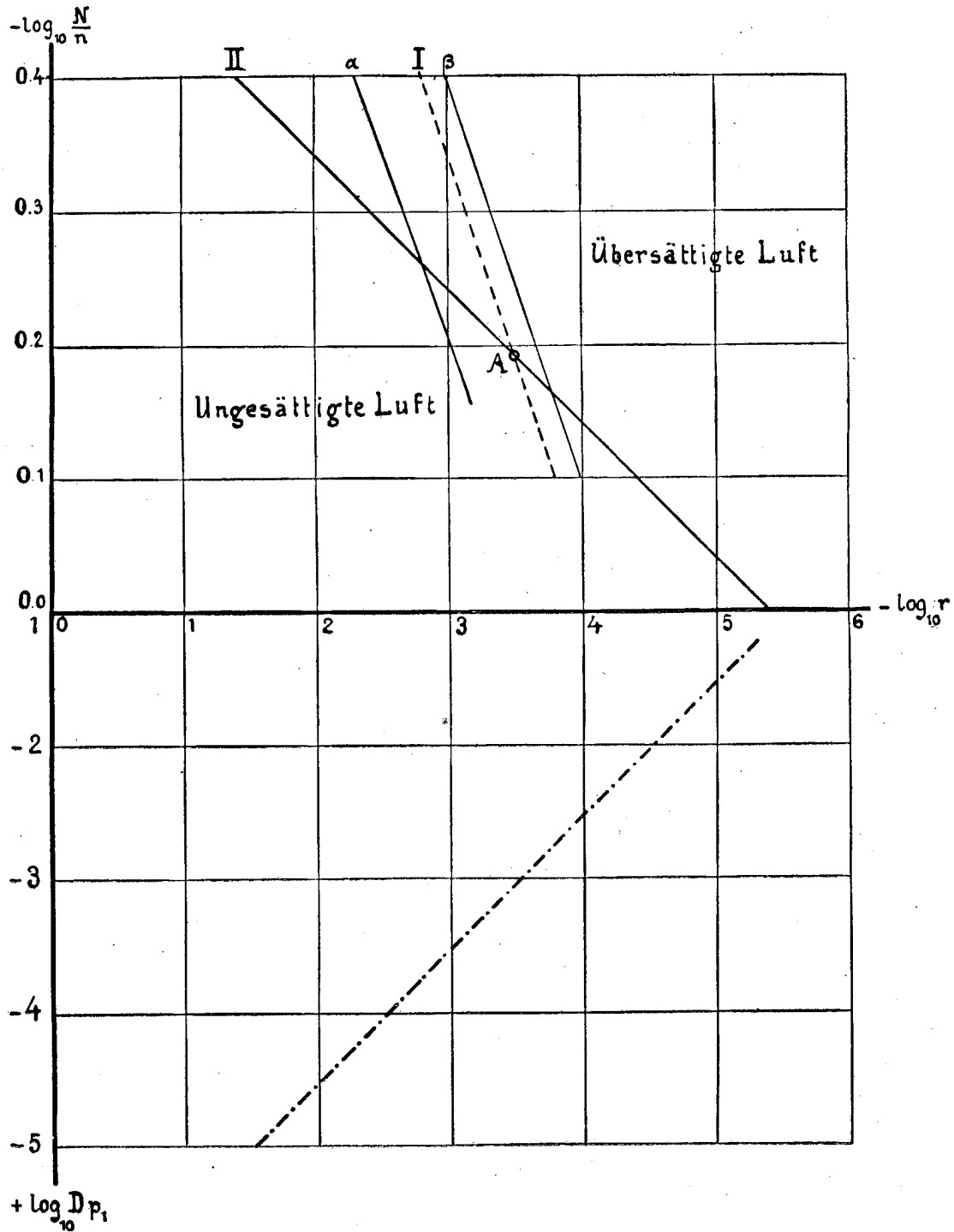
In der kleinen Tabelle 1 sind diese Resultate angegeben. Links stehen die Konzentrationen, rechts die entsprechenden Tröpfchengrößen.

In der Tabelle 2 habe ich die Tröpfchengrößen berechnet, die in *diesem* Falle bei den verschiedenen Konzentrationen wirklich vorhanden sein müssen. Die gefundene Konzentration war $10^{-4} \cdot N$ und die Tröpfchenradien $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. Wenn diese Tröpfchen verdunsten, wird die Konzentration grösser und die Radien werden kleiner. Die correspondierenden Werte, die man in dieser Weise erhalten würde, sind in der Tabelle 2 berechnet.

Früher wurde bemerkt, dass die Luft mit Feuchtigkeit gesättigt war. Aus den zwei Tabellen ist ersichtlich, dass die Luft in der Nähe der Tröpfchen in Wirklichkeit etwas übersättigt sein muss, wenn Gleichgewicht vorhanden sein soll. Diese Übersättigung ist jedoch sehr klein und kann mit unseren gewöhnlichen meteorologischen Instrumenten nicht gemessen werden. Erst bei einer Konzentration von etwa $N \cdot 10^{-2}$ tritt vollkommene Gleichgewicht ein.

Um die Gedankenfolge klarer darzustellen sind die Tabellen auch graphisch dargestellt. Dabei sind die Radien und die Konzentrationen logarithmiert (Briggs), da die Kurven andernfalls einen unverhältnismässig grossen Platz hätten nehmen sollen. Als Abscissenachse ist $N \cdot 1$ genommen. Die dick ausgezogene Kurve ist der geometrische Ausdruck von $\log Dp_1 - \log Dp_2 = 0$ und die gestrichelte Kurve I gibt den Zuwachs der Tröpfchen unter Kondensation. Unter der Basislinie findet sich eine Kurve, die den linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus des Tröpfchenradius und dem Logarithmus der Dampfdruckerhöhung ausdrückt. Keine von diesen Kurven ist in der Wirklichkeit vollständig linear. Absolut exakt können diese Kurven erst da gezeichnet werden,

¹ Siehe z. B. A. Wegener, Thermodynamik der Atmosphäre.



wenn man Dichte der Salze, Kontraktion und Dissoziation der Lösungen und Kapillaritätskonstante bei jeder Temperatur und jeder Konzentration genau untersucht hat. Die Genauigkeit ist doch hinreichend um mehrere wichtige Schlüsse aus den Kurven ziehen zu können. Die Kurve II, $\log D p_1 - \log D p_2 = 0$ bezeichnet eine Grenze. Befriedigen der Radius und die Konzentration diese Gleichung, befindet sich das Tröpfchen in stabiler Gleichgewicht in gesättigter Luft. Ist $\log D p_1 - \log D p_2 > 0$, kann das Tröpfchen in gesättigter Luft nicht in Gleichgewicht sein, sondern muss teilweise verdunsten. Soll es in

Gleichgewicht sein, muss es sich in übersättigter Luft befinden, also rechts von der Kurve II. Wird $\log Dp_1 - \log Dp_2 < 0$, kann das Tröpfchen auch nicht in gesättigter Luft in Gleichgewicht sein, sondern muss wachsen. In diesem Fall muss es in ungesättigter Luft sein, um in Gleichgewicht zu sein, also links von der Kurve II. Falls diese Ungleichung gross ist, muss das Tröpfchen schon in ungesättigter Luft wachsen. Hiernach nenne ich die Kurve II *Grenzkurve*, und die Tröpfchen, die auf ihr in Gleichgewicht sind, *Grenztröpfchen*.

Die Kurve I zeigt das Wachsen eines Salzpartikelebens von hier behandelter Grösse unter Aufnahme von Wasser. Sie schneidet die Grenzkurve im Punkte A. Die in der Nähe des Schnittpunktes auf den beiden Kurven markierten Punkte geben an, dass die Verdünnung auf beiden Kurven $N \cdot 10^{-2}$ ist, welche Punkte in den Tabellen 1 und 2 fett gedruckt sind. Der Schnittpunkt ist für die folgende Darlegung von grösster Bedeutung. Der Tröpfchenradius, der dem Punkte A entspricht — der Radius des Grenztröpfchens in diesem Falle — ist $3.1 \cdot 10^{-4}$ cm. Die Salzkonzentration ist sehr nahe gleich $N \cdot 10^{-2}$. Die Konzentration der Salze in den Grenztröpfchen wird jetzt *Grenzkonzentration* genannt. Die Kurven wie I werden *Tröpfchenkurven* genannt.

Wenn diese Darlegung eine Meinung haben soll, müssen diese Grenztröpfchen in der gesättigten Luft angetroffen werden. Nach den Berechnungen, die A. Wegener, ausgeführt hat, solle der Radius der Wolkentröpfchen zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ cm. und $5 \cdot 10^{-3}$ cm. liegen. Von einem Radius wie dem dieses Grenztröpfchens, der etwa ein Zehntel von demjenigen der Wegenerschen Tropfengrösse ist, hört man nichts. Indessen findet man in *Pernters* »Meteorologische Optik« aus den »Messungen von Kämtz« den 24. Mai 1832 Angabe von Tröpfchen mit dem Radius $4.8 \cdot 10^{-4}$ cm. Aus den »Messungen auf dem Ben Nevis (Sommermonate)« findet man den 10. April 1884 einen Radius von $4.7 \cdot 10^{-4}$ cm. und den 22. Oktober 1885 $4.3 \cdot 10^{-4}$ cm. Aus den »Messungen auf dem Ben Nevis (Wintermonate)« findet man mehrere Elemente von derselben Grössenordnung, die wahrscheinlich Tröpfchen und nicht Eispartikelchen gewesen sind. Indessen ist diese Anzahl der Messungen zu klein um darin einen Beweis für die Realität des Grenztröpfchens zu sehen. Es ist doch leicht zu verstehen, dass diese Grenztröpfchen im Allgemeinen sich unseren Messungen entziehen müssen. Der Mechanismus der Bildung der abgegrenzten Wolken wird kürzlich später besprochen. Hier sei nur erwähnt, dass man im Inneren der Wolken mit grösster Wahrscheinlichkeit eine höhere Tröpfchengrösse finden muss als in den Grenzschichten. In diesen Schichten müssen die Tröpfchen in Gleichgewicht mit der gesättigten Luft sein. Die Übersättigungshypothese wird also verworfen. Im Inneren dagegen können die Tröpfchen in gegenseitiger Gleichgewicht weiter wachsen. Dafür ist zwar eine kleine Übersättigung nötig. Diese ist doch im Allgemeinen sehr unbedeutend. Nachdem die Tröpfchen eine bestimmte Grösse erreicht haben, beginnt auch hier ein Zusammenfliessen.

Die Messungen, die ich ausgeführt habe, haben diese meine Ansicht bestätigt. Zu bemerken ist, dass Messungen in den äusseren Schichten der Wolken sehr schwer sind und fast immer zu grosse Tröpfchenradien geben. Die Radien wachsen nämlich gegen das Innere sehr schnell zur Radiengrösse der Wegenerschen Tropfen. Da das Strahlenbündel bei optischen Messungen ein recht grosses Durchschnittsareal haben muss, um deutliche Ringe geben zu können, misst man in der Wirklichkeit auch Tröpfchen aus dem Inneren.

Von meinen Messungen wähle ich zwei typische Grenzmessungen. Die eine ist bei einer Temperatur von $+1.7^{\circ}$, die andere bei -4.7° ausgeführt. Ich war auch so glücklich direkt und unwiederlegbar beweisen zu können, dass die Wolke im letzten Falle wirklich aus Wassertröpfchen bestand. Der Radius war im ersten Falle $4.0 \cdot 10^{-4}$ und im letzten $3.5 \cdot 10^{-4}$ cm. Die Übereinstimmung zwischen dem aus der gefundenen Chlornatriummenge

und dem bei diesen Messungen gefundenen ist also auffallend gut. Die Existenz eines Grenztröpfchens von der in diesem Falle nötigen Grösse ist hierdurch bewiesen.

Diese Darlegung berechtigt die atmosphärischen Verhältnisse ein wenig näher mit Hilfe der Figur zu betrachten. Das Grenztröpfchen hatte einen Radius von $3.1 \cdot 10^{-4}$ cm. und die Grenzkonzentration war $N \cdot 10^{-2}$. Dies Ergebnis wurde dadurch erreicht, dass die per Liter gefundene Chlornatriummenge gleichmässig auf die Tröpfchen mit einem Radius von $1.5 \cdot 10^{-3}$ verteilt wurde. Die kleinen Partikelchen zogen Wasser an sich und wurden immer grösser. Die Kurve I gibt den Verlauf seines Wachstums an. Das Tröpfchen wächst längs dieser Kurve ohne mit anderen Tröpfchen zusammenzufließen. Um das Ergebnis zu prüfen wird einige Annahmen gemacht, die von den gefundenen Ergebnissen abweichen.

Unter Voraussetzung, dass die gefundene Salzkonzentration konstant ist, nehme ich an, dass die Verteilung eine andere ist, und zwar so, dass der Tröpfchenradius bei meiner Konzentration gleich 10^{-3} cm. ist. Man erhält da die Kurve β . Diese ist nicht vollständig ausgezogen, da ihr Verlauf bei grösserer Konzentration ein wenig unsicher ist. Diese Kurve schneidet die Grenzkurve bei einem Tröpfchenradius von $1.3 \cdot 10^{-4}$ cm. So winzige Tröpfchen sind niemals in gesättigter Luft beobachtet. Ob sie vorkommen, ist unmöglich zu sagen. Dass einzelne so winzige Tröpfchen in den äusseren Schichten auftreten, ist nicht theoretisch unmöglich, jedenfalls müssen sie selten sein. Je weiter nach rechts man auf der Grenzkurve geht, desto minder wird die Wahrscheinlichkeit, dass man Schnittpunkte mit der Tröpfchenkurve findet. Erstens wird das Übersättigungsgebiet, dass das Tröpfchen überschreiten muss, immer grösser. Wichtiger ist der Umstand, dass die Grösse der Partikelchen eine untere Grenze haben muss, da das Meereswasser seine maximale Verdunstung bei den vorhandenen Verhältnissen erreicht hat. Diese untere Grenze muss bei einem Radius von etwa 10^{-6} cm. liegen, und liegt für Partikelchen, die die grösste Bedeutung für die Wolkenbildung hat etwas über 10^{-5} . Schon diese Grösse kann nicht sehr gewöhnlich sein. Demnach ist die von mir angenommene Grösse schon sehr winzig und liegt in der Nähe der unteren Grenze. Tröpfchen, mit einer solchen Konzentration von Salzen, die ich gefunden habe, können schwerlich kleiner als $1.5 \cdot 10^{-3}$ sein; Tröpfchenkurven, die rechts von I liegen, sind daher unwahrscheinlich.

Zweitens wird angenommen, dass der Tröpfchenradius seinen maximalen Wegenerschen Wert $5 \cdot 10^{-3}$ erreicht hat, dass also die kleine Salzmenge in grössere Partikelchen verteilt war. Somit wird a die Tröpfchenkurve. Sie schneidet die Grenzkurve bei einem Tröpfchenradius von $1.6 \cdot 10^{-3}$ cm. *In einer Wolke oder einem Nebel, wo die Schichten-tröpfchen $1.6 \cdot 10^{-3}$ cm. sind, hat man also die grössten Wegenerschen Tröpfchen.* In diesem Satz gipfeln meine Ergebnisse. Bei unserer Konzentration sind wir die Wegenerschen Grenze sehr nahe, nämlich $5 \cdot 10^{-3}$ und $1.5 \cdot 10^{-3}$. Diese Grenzen entsprechen auf der Grenzkurve sehr nahe die unteren Wegenerschen Grenze, nämlich $1.6 \cdot 10^{-3}$, und eine niedrige Grenze $3.1 \cdot 10^{-4}$, die ich durch genaue Messungen gefunden habe. Die Theorie hat sich hierdurch als wahr erwiesen. In der Höhe, wo ich meine Messungen ausgeführt habe, sind die grössten gefundenen Tröpfchenradien $3.3 \cdot 10^{-3}$, was einem Grenztröpfchen von einem Radius $6.3 \cdot 10^{-4}$ entspricht. Die Grösse dieses Radius ist ausserordentlich gewöhnlich¹.

Wird Rücksicht auf die obere Grenze Wegeners genommen, haben wir also im Inneren der ausgebildeten Wolken die Tröpfchengrenzen $5.0 \cdot 10^{-3} > r \geq 1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. In den äusseren Schichten sind, wenn die Wolken in gesättigter Luft schweben, die entsprechenden Grenzen $1.6 \cdot 10^{-3} > r \geq 3.1 \cdot 10^{-4}$ cm.

¹ Viele Messungen bei Pernter haben diese Grösse gegeben und ich habe viele Messungen bei verschiedenen Temperaturen ausgeführt, die diese Grösse geliefert haben.

Weiter angenommen, dass die Chlormenge schwankt, geben meine Kurven das notwendige Material zur richtigen Beurteilung dieser Annahme. Wenn die Menge grösser ist, ihre Verteilung aber dieselbe, womit übereinstimmend aus dieser grösseren Menge dieselbe Anzahl Partikelchen hervorgehen, die also grösser sind, gehe ich längs einer Ordinate vom Punkte 1 nach unten. Das vorhandene Tröpfchen — der Radius gleich $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. — wird konstant gehalten unter erhöhter Konzentration. Ich gehe bis zu einer Konzentration von $N \cdot 10^{-3}$. Wenn diese Konzentration bei einer Tröpfchengrösse von $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. z. B. gefunden wurde, sollte erst bei einem Radius von $3.4 \cdot 10^{-3}$ an die Konzentration $N \cdot 10^{-4}$ erreicht sein. Hätten sich z. B. diese letzten Tröpfchen als Rauheis niedergeschlagen, hätte man in diesem unsere gefundene Konzentration haben sollen. Hätten sich die Tröpfchen $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. als Rauhfrost abgelagert, müsste man zehnmal grössere Menge gefunden haben oder 58 mgr pr. Liter. Eine so grosse Menge ist sehr selten. Gesetzt, dass sich niemals so kleine Tröpfchen wie $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. als Rauhfrost absetzen, welche Annahme doch falsch ist, kann man von z. B. Tröpfchen mit einem Radius gleich $2.2 \cdot 10^{-3}$ cm. ausgehen. Diese werden bei einer Konzentration $N \cdot 10^{-4}$ gleich dem seltenen Wert $5 \cdot 10^{-3}$ cm. Hätten sich jene Tröpfchen — $2.2 \cdot 10^{-3}$ cm. — als rauheisähnlicher Rauhfrost abgesetzt, hätte man dieselbe seltene grosse Menge erhalten sollen. Noch eine Annahme will ich machen, nämlich dass die Konzentration bei Ablagerung von Frost $2N \cdot 10^{-4}$ sein kann, d. h. 11.7 mgr. per Liter. Der Radius $1.5 \cdot 10^{-3}$ wird beim Erreichen unserer Konzentration gleich $1.8 \cdot 10^{-5}$. Die Untersuchung anderer Tröpfchengrössen ist unnötig.

Schliesslich nehme ich an, dass die Chlormenge zu gross ist. In jedem Tröpfchen befinden sich da kleinere Partikelchen, stets gleiche Verteilung vorausgesetzt. Diese Annahme ist schon nach dem Vorangehenden sehr unwahrscheinlich, da man zu Grenztröpfchen gehen muss, die in Wolken nie beobachtet sind. Man erhält hier das Ergebnis, dass die Annahme von der Hälfte unserer Chlormenge einen Tröpfchenradius von etwa 10^{-3} fordert bei Verdunstung bis zu unserer Konzentration $N \cdot 10^{-4}$ indem von $1.5 \cdot 10^{-3}$ ausgegangen wird. Also auch hier dieselbe kleine Veränderung des Radius bei grosser Konzentrationsveränderung. Da das Volumen direkt und also die Konzentration indirekt proportional r^3 ist, sind diese Ergebnisse selbstverständlich. Eine Verminderung der Salzmenge führt zu nie beobachteten Tröpfchengrössen, eine Vergrösserung zu Tröpfchengrössen die freilich binnen unseren Grenzen liegen, aber auch so gross, dass sie Frostablagerungen bilden können. Frostablagerungen mit grösserem Salzgehalt als dem hier angegebenen sind selten gefunden. In Bezug auf unser kleinstes, analysiertes Tröpfchen nehmen wir noch an, dass es unter Kondensation wächst, bis es einen Radius von $3.2 \cdot 10^{-3}$ erreicht. Diese Tröpfchengrösse liegt unserer oberen Radiusgrenze sehr nahe. Die Konzentration ist da $N \cdot 10^{-5}$, was 0.58 mgr per Liter entspricht. Diese Menge ist sehr schwer zu bestimmen und niemals beobachtet worden. So grosse Tröpfchen würden jedoch Ablagerungen bilden und hätte meine Aufmerksamkeit nicht entgehen können. Auf die wahrscheinlich vorkommenden Umstände, wo man doch eine solche Konzentration finden mag, wird hier nicht eingegangen. Obgleich meine Untersuchungen bei Weitem nicht beendet sind, will ich um die folgenden Schlüsse klarer zu machen noch zwei Beispiele erwähnen.

Einmal fand ich in einer Rauhfrostablagerung eine Salzmenge, die $N \cdot 7 \cdot 10^{-5}$ entspricht. Die Tröpfchen hatten da einen Radius von $2.4 \cdot 10^{-3}$ cm. Bei einer Konzentration von 10^{-4} . N muss dieses Tröpfchen, wenn dessen Zuwachs nur durch Kondensation stattgefunden hätte, einen Radius von $2 \cdot 10^{-3}$ cm. besitzen.

Einen vollkommen isolierten Fall, der niemals früher oder später eingetroffen ist, möchte ich auch erwähnen. In einer Nacht lagerte sich kolossale Mengen von reinem

¹ Hilding Köhler, l. c.

Eis ab. Die Temperatur war unter 0° , warum wir es als Rauheis¹ betrachten können. Es hatte sich also aus Tröpfchen gebildet. Diese Tröpfchen hatte ich leider keine Gelegenheit zu messen. Auf Grund meiner Erfahrung kann ich doch ruhig annehmen, dass der Radius etwa $3.3 \cdot 10^{-3}$ war. Die Salzmenge wurde doch bestimmt und eine Konzentration von $3.2 \cdot 10^{-5} \cdot N$ gefunden. Nach obenstehender Annahme der Radiengrösse entspricht dies bei unserer Konzentration einem Radius von $2.2 \cdot 10^{-3}$ cm., wenn das Tröpfchen durch reine Kondensation gewachsen ist.

Folgerung dieser Darlegung.

Der nur scheinbar eigentümliche Umstand, dass Wolken mit verschiedener Tröpfchengrösse fast dieselbe Salzmenge liefern, wird jetzt seine Erklärung finden. Die Wolkenpartikelchen sind von Anfang an aus Salzkörnchen verschiedener Grösse entwickelt, die in einem Grössenintervall liegen, das eben bei der Konzentration $N \cdot 10^{-4}$ zu Tröpfchen mit Radien führen, die obenstehende Ungleichung befriedigen und erst nachdem ein bestimmter Radius mit einer bestimmten Salzkonzentration erreicht ist, können diese Tröpfchen zusammenfliessen. Dabei muss man annehmen, dass wenn einmal das Zusammenfliessen angefangen hat, dies sehr schnell weiter stattfindet. Nach meiner Erfahrung ist dies eben der Fall. Natürlich ist bei rascher Kondensation möglich, dass die Tröpfchen hauptsächlich durch Kondensation wachsen. So war bei der Gelegenheit der Fall, wo die Eisablagerung stattfand. Die Frage, warum Tröpfchen, die bei der Kondensation $N \cdot 10^{-4}$ einen Radius von z. B. $3.3 \cdot 10^{-3}$ cm. haben, nur selten früher in ihrer Entwicklung z. B. bei einem Radius von $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm. sich als Frost abgelagert hat, wird hier nicht endgültig beantwortet¹. Teilweise findet dieser Fall seine Erklärung in dem Umstande, dass natürlich vor einer Wolkenbildung in der Atmosphäre niemals Salzkörnchen von nur einer einzigen Grösse vorhanden sind. Dies wird später in dieser Abhandlung etwas näher erörtert. Dabei werden die isolierten Wolkenbildungen, die eben Material für unsere Tröpfchenmessungen liefern, Erklärung finden. Eben dadurch, dass diese Erklärung möglich ist, in Verbindung mit meinen Analysen gesetzt, zwingt sich mit Notwendigkeit folgender Satz hervor, worin diese Darlegung gipfelt.

Die verschiedene Grösse der Tröpfchen in niederschlagsfreien Wolken, die gleichzeitig in derselben Höhe schweben, und in welchen die meisten Messungen ausgeführt sind, beruhen darauf, dass die Tröpfchen sich aus Salzpartikelchen verschiedener Grösse entwickelt haben.

Zonen der Atmosphäre.

Zu Grunde der obigen Darstellung, liegen meine Untersuchungen auf dem Haldde-Observatorium. Ich habe bei meiner Diskussion von Tröpfchen und Konzentration *nur auf Tatsachen* gebaut. Ich befand mich die ganze Zeit auf und über die Grenzkurve. Gehen wir weit unter diese, muss man die Hypothese, die ich anfangs über das Vorhandensein von $MgCl_2$ aufstellte in Betracht nehmen. Obgleich leichtlöslich, ist das Chlor-natrium nicht hygroskopisch. Diese Tatsache machte der Befindlichkeit des Chlormagne-

¹ Eine vollständige Erklärung dieses Umstandes würde mich in Gebiet führen, wo meine Untersuchungen nicht hinreichend weit getrieben sind. Es ist klar, dass man in verschiedenen Höhen verschiedene Mengen von Salzen finden mag.

siums in jedem Salzpartikelchen notwendig. Diese Hypothese will ich ein wenig näher betrachten, bevor ich einige kurze Betrachtungen über die Verhältnisse unter der Grenzkurve mache.

Gewöhnliches Kochsalz enthält bekanntlich fast immer Magnesiumsalze und zwar besonders $MgCl_2$. Deren Vorkommen bewirkt, dass $NaCl$ von Feuchtigkeit glänzt¹. Es wird Wasser durch das im Chlornatrium befindliche Chlormagnesium herangezogen. Vollkommen magnesiumfreies Chlornatrium ist zwar schwer zu erhalten. Meine Hypothese wird schon dadurch sehr glaublich. Um das Vorhandensein des Chlormagnesiums noch sicherer zu machen und gleichzeitig die von mir angenommene Verteilung zu bestätigen, soll auf den Ursprung der Salze eingegangen sein. Ich habe schon genannt, dass sie vom Meere aufgetrieben werden. (Ich kann nicht auf die Frage eingehen, ob eventuell auch die feste Erdoberfläche einige winzige Mengen liefert. Gross können diese jedenfalls nicht sein. Auf der festen Erdoberfläche fühlt man niemals den Salzgeschmack, wenn man sich nicht in die Salzsteppen verirrt hat. Jeder, der eine Seereise gemacht hat, weis dagegen, dass die Luft bedeutende Mengen von Meeressalzen enthält.) In der Meeresoberfläche sind die Salze praktisch regelmässig verteilt. Die Winde, die über der Oberfläche wehen, reissen Tröpfchen mit sich. Dies geschieht nicht nur beim Überstürzen der Wellen, sondern sobald der Wind bestimmte Geschwindigkeit erreicht hat, auch direkt aus dem Wasser. Jedes Tröpfchen, das mechanisch aufgetrieben wird, wie klein es auch sein mag, enthält dieselbe Salzkonzentration in derselben Verteilung wie in der Meeresoberfläche². Dadurch erhält man die Kondensationskerne und das Hypothetische in meiner Annahme vom Vorhandensein des Chlormagnesiums wird in eine Tatsache verwandelt³. Man kann ruhig sagen, dass das Vorhandensein von Chlornatrium mit Notwendigkeit mit sich Chlormagnesium bringt, wenn man nicht durch grosse Anstrengungen dieses entfernt hat.

Das Meer bedeckt den grössten Teil, etwa 70 %, der Erdoberfläche. In der Meeresoberfläche hat man etwa 35 gr. Salze per Liter gefunden. (Diese Menge schwankt ein wenig, man braucht aber nicht Rücksicht darauf zu nehmen.) Die Chlorverbindungen sind vorherrschend, besonders Chlornatrium mit etwa 78 % und Chlormagnesium mit 11 %. In der Atmosphäre hat man in 900 m. Seehöhe eine Menge per Liter gefunden, die mit der Grösse der Tröpfchen etwas schwanken kann. Vom Ausgangspunkt meiner obenstehenden Darstellung kann ich diese Menge unter Rücksichtnahme aller von mir hervorgehobenen Tatsachen zu durchschnittlich $35 \cdot 10^{-4}$ gr. per Liter setzen. Dies beträgt ein zehntausendstel von den Salzen in der Meeresoberfläche. Diese winzige Menge von den Meeressalzen nehmen also im Kreislaufe Teil.

In Betracht der grossen Ausbreitung der Meeresoberfläche, ist nicht zu kühn zu behaupten, dass diese winzige Salzmenge in der Atmosphäre zu einer gewissen mit dem Orte schwankenden Höhe vorkommt. Diese Höhe ist natürlich nicht scharf definiert. Indessen kann eine Zone nach Oben und Unten abgegrenzt werden, wo diese Salze eine wichtige Rolle bei der Kondensation spielen. Diese Zone will ich *Magnesium-Natrium-Zone* (verkürzt *MgNa-Zone*) nennen. Hier haben wir die Grenzkurve, die Grenztröpfchen und die Tröpfchenkurve, wie sie von mir angegeben sind. In höheren Schichten kann man sicherlich ähnliche Zonen finden z. B. Ammonium-Nitrat oder Ozon-haltige mit Emanation u. s. v. Die Grenzkurven dieser verschiedenen Zonen können sich nicht viel von denjenigen der *MgNa-Zone* unterscheiden. Die Tröpfchenkurven erhalten dagegen einem anderen Verlauf und die Grenztröpfchen sind andere. Die Verhältnisse werden komplizierter und schwerer zu überblicken als in der *MgNa-Zone*. Das ist wohl natürlich, dass diese Zonen sowohl momentan als durch verschiedene andere Verhältnisse gebrochen und gemischt werden können. Darauf gehe ich hier nicht ein.

¹ Siche Lehrbücher in Chemie z. B. Hollemann oder Erdmann.

² Diese Behauptung hat nicht generelle Bedeutung

³ Später habe ich eine Analyse auf Magnesium ausgeführt und ein wenig mehr als die berechnete Menge gefunden.

In der MgNa-Zone findet eine lebhaftere Kondensation statt. Ein grosser Teil des kondensierten Wassers hat vom Meere direkten Ursprung. Ich nehme an¹, dass das in dieser Zone kondensierte und herabfallende Wasser auf 80 % vom Meere herrührt und das 70 % alles verdunsteten Wassers in dieser Zone kondensiert wird. Nach einer einfachen Rechnung ergibt sich daraus, dass etwa $16 \cdot 10^{-5}$ Teilen von den Salzen der Meeresoberfläche aufgetrieben werden müssen, wenn ein Teil Wasser verdunstet. Diese Menge ist sehr glaublich².

Bemerkungen von Praktischer Natur.

Um Missverständnisse zu entgehen muss ich hier darauf aufmerksam machen, dass die bisherige Darlegung, wie schon früher erwähnt ist, von jeder Annahme über Temperaturwechselungen vollkommen frei ist. Man darf nicht glauben, dass die Tröpfchenkurven etwa die Bahn eines Partikelchens ist, während des Aufsteigens der Luft. In diesem Falle ist es notwendig viel tiefer zu gehen und das Problem etwas anderes anzugreifen. Hier muss man auch Rücksicht auf die kleinen Veränderungen in der Lage der Grenzkurve nehmen. Dies wird erst in einer endgültigen Arbeit berücksichtigt und gründlich dargelegt. Diese Umstände spielen keine Rolle für diese Darlegung, die immer prinzipiell unverändert bleibt. Im Ausdrucke $Dp_1 - Dp_2 = 0$ spielt nämlich der Dampfdruck³ keine oder, wenn man sehr genau sein will, eine verschwindend kleine Rolle. Für die Veränderung der Dampfkurve ist nur der Faktor S/T im ersten Glied von Bedeutung und spielt, wie man ohne weiteres sehen kann, eine sekundäre Rolle, wenn man nicht, wie früher angemerkt, zu sehr hohen oder sehr niedrigen Temperaturen geht.

Ich betrachte jetzt ein Partikelchen, das in der Atmosphäre frei schwebt. Ihm muss immer so viel Wasser folgen, dass Gleichgewicht zwischen dem Dampfdruck der Atmosphäre und derjenigen seiner Oberfläche existiert. Es verhält sich vollkommen wie ein Kristall in dessen Lösung, der löst sich auf oder wächst je nachdem die Lösung verdünnt oder konzentriert wird. Es kann schwerlich unter den herrschenden atmosphärischen Verhältnissen ausgetrocknet werden. Folgt man der Entwicklung eines solchen Partikelchens, das ruhig in einem gewissen Niveau der Atmosphäre schwebt, und nehmen wir als einen Idealfall an, dass die Temperatur unverändert bleibt, dass aber die Feuchtigkeit steigt, so wächst dieses Partikelchen vollkommen kontinuierlich längs einer Tröpfchenkurve und wird schliesslich als Wassertröpfchen sichtbar. In der Atmosphäre schweben also immer eine grössere oder kleinere Anzahl kleiner Wasserkügelchen mit einer Salzmenge. Bei einer sehr hohen Konzentration können diese Partikelchen im Gleichgewicht bei Temperaturen weit unter 0° sein. Der Umstand, dass diese Lösungen in der Atmosphäre schweben und also den aufsteigenden Luftströmen folgen, bewirkt, dass andere und kontinuierlichere, wenn ich so sagen darf, Gesichtspunkte auf das Kondensationsproblem gelegt werden müssen. Schon aus dem, was ich hier gesagt habe, erhellt, dass »Die Trübung« der Atmosphäre für das Kondensationsproblem sehr wichtig ist. Vor allem muss sehr genau ausgeforscht werden, welcher Zusammenhang zwischen Anzahl und Grösse der Partikelchen und der Sichtbarkeit vorhanden ist. Vielleicht sind solche Untersuchungen schon ausgeführt.

¹ Diese Annahme sind willkürlich.

² Vielleicht ist es notwendig die Aufmerksamkeit auf das allgemein bekannte Verhältnis zu richten, dass die Löslichkeit des Chlornatriums nur wenig mit der Temperatur veränderlich ist, was auch unter 0° gilt (bis zu einer bestimmten Grenze).

³ Unter den hier gebrauchten vereinfachenden Annahmen.

Ohne weiter im Verlauf der Kondensation zu gehen, was ein Vorgehen meiner Untersuchungen wäre, kann ich aus dem schon Gesagten einen sehr wichtigen Schluss ziehen. Ich betrachte die Verhältnisse, indem ein Regenstreifen über das Meer wandert. Die Luft über dem Meere ist mit grossen Mengen von mehr oder minder wasserhaltigen Salzpartikelchen oder besser mit verschiedenen konzentrierten Tröpfchen von verschiedenen Grössen bemengt. Beim Kondensieren in der Luft kann man einer ganzen Serie von solchen Partikelchen von verschiedener Grösse im Gedanken folgen. Ich kann ohne bemerkbaren Fehler hier annehmen, dass sie die verschiedenen Tröpfchenkurven durchlaufen. Je grösser das Partikelchen ursprünglich war, desto schneller läuft es, und desto schneller fällt es als Regen hinunter. Man erhält also dadurch eine Aussonderung der grösseren Partikelchen. Die Tröpfchen mit kleineren Salzmenngen werden weiter getrieben und treten als niederschlagsfreien Wolken auf. Man kann also sagen, dass die Tröpfchenkurven von links nach rechts verschoben werden, wenn man von dem Regenstreifen in die Windrichtung geht. Hierdurch erhält man also eine Erklärung von dem Auftreten frei in der Atmosphäre schwebender Wolken, die man jeden Tag beobachtet und nicht verstanden hat. Diese Wolken bestehen aus Tröpfchen, die die aufgestellten Ungleichungen befriedigen. In den äusseren Schichten befinden sich Tröpfchen, die in Gleichgewicht mit dem in der Atmosphäre herrschenden Dampfdruck sind. Demgemäss kann eine solche Wolke in ungesättigter Luft vorkommen. Kommt sie auf ihrer Bahn in immer trockenere Luft ein, lösen sich die Tröpfchen immer mehr auf. Sie verschwinden in Wirklichkeit nicht, sie werden nur unsichtbar. Will man exakt sein, kann man sagen, dass eigentlich keine bestimmte Wolkengrenze vorkommt. Wo wir eine Grenze sehen, setzen die unsichtbaren Tröpfchen fort. Dadurch werden Kondensationskerne, das ist kleine Tröpfchen, mit den Wolken weiter geführt. Sie können auf einem anderen Platz wieder als Wolken sichtbar werden. Dadurch dass diese Ausscheidung von den grösseren Kernen mehrmals wiederholt wird, erhält man Wolken — ich meine damit begrenzte Lufträume mit sichtbaren Wassertröpfchen — die eine ganz bestimmte Tröpfchengrösse haben kann und eine bestimmte Salzkonzentration.

Bemerkungen zur Unterkühlung.

A. Wegener hat auf seiner Grönlandsreise 1912/1913 Wassertröpfchen bei -34.5° optisch nachgewiesen. Vereinzelt sind flüssige Tröpfchen bei verschiedenen niedrigen Temperaturen beobachtet worden. Meines Wissens ist keine systematische Untersuchung über ihr Vorkommen ausgeführt. Man ist scheinbar im Unklaren, ob ihr Vorkommen unter 0° bis zu einer bestimmten niedrigen Temperatur eine Regel ist oder nur eine Zufälligkeit. Meinen fünfjährigen Untersuchungen gemäss ist ihr Vorkommen wenigstens bis zu -15° zu einer bestimmten Grenze im Allgemeinen die Regel. Die Erklärung dieser Unterkühlung war den alten Theorien nach sehr schwer, da man annehmen müsste, dass der Dampf sich als Wasser unter 0° kondensierte, obgleich flüssiges Wasser einen höheren Dampfdruck hat als das Eis. Der Verlauf dieser Kondensation war im höchsten Grade rätselhaft. Nachdem ich jetzt nachgewiesen habe, dass Salzpartikelchen mit Wasser vorkommen, fällt das Rätselhafte weg.

$MgCl_2$ hat wie bekannt eine anomale Gefrierpunkterniedrigung, das heisst, die Erniedrigung des Gefrierpunktes ist nicht proportional der Menge des zugegebenen Salzes, sondern unverhältnismässig viel grösser. Die Gefrierpunktskurve des Chlornatriums ist

allgemein bekannt. Die hier eingeführten Salzpartikelchen machen er also ganz klar, dass flüssiges Wasser in der Atmosphäre bei sehr niedrigen Temperaturen existieren kann und muss. Erst nachdem die Tröpfchen eine bestimmte Grösse erreicht haben, tritt Unterkühlung ein, die jedoch vielleicht auch seine Erklärung erhalten kann. Die Wegenersche Frostübersättigung *kann* darauf beruhen, dass unsichtbare Partikelchen mit Wassermolekülen in der Atmosphäre schweben. Die müssen nicht notwendig unsere Partikelchen sein. Die Auslösung, von welcher Wegener spricht, muss dann auf Zuführung von Wasser und nicht von Kernen aus dem Hause und von den Tieren¹ bewirkt sein. Meiner Meinung nach muss dies so sein.²

¹ Met. Zeit. Heft 1/2 1920.

² Die Frostübersättigung wird in der zweiten Mitteilung näher erörtert.