

- 61,96 -

Deutscher Wetterdienst in der US-Zone

Zentralamt Bad Kissingen

Leiter: Prof. Dr. Ludwig Weickmann

---

# Berichte

des

## Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone

1. Band

*Wetterdienst-  
Bibliothek*

Bad Kissingen, 1947/1949

△  
I A 11

## INHALT DES 1. BANDES

- Nr. 1: Gerhard Schulz, Die Arbeiten und Forschungsergebnisse der Wolkenforschungsstelle des Reichsamtes für Wetterdienst in Prag.

Anhang:

W. Findeisen: Ergebnisse von Wolken- und Niederschlagsbeobachtungen bei Wettererkundungsflügen über See.

— — : Temperatur- und Feuchtemessungen bei hohen Fluggeschwindigkeiten.

— — und B. Walliser: Experimenteller Nachweis der Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit.

— — und G. Schulz: Experimentelle Untersuchungen über die atmosphärische Eisteilchenbildung I.

- Nr. 2: Fritz Schnelle, Studien zur Phänologie Mitteleuropas.

- Nr. 3: Werner Schwerdtfeger, Untersuchungen über den Aufbau von Fronten und Kaltlufttropfen.

- Nr. 4: Kurt Bullrich, Die Leuchtdichte des Himmels und die Globalbeleuchtungsstärke während der Dämmerung und in der Nacht.

- Nr. 5: Karl Brocks, Über den täglichen und jährlichen Gang der Höhenabhängigkeit der Temperatur in den unteren 300 Metern der Atmosphäre und ihren Zusammenhang mit der Konvektion.

- Nr. 6: Helmut Weickmann, Die Eisphase in der Atmosphäre.

- Nr. 7: Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, Der heiße und trockene Sommer 1947.

- Nr. 8: Ursel Krug-Pielsticker, Messungen der Sonnenstrahlung bei Flugzeugaufstiegen bis 9 km Höhe.

- Nr. 9: Fritz Herath, Inversionsstudie auf Grund der Lindenberger Fesselaufstiege mit besonderer Berücksichtigung der Ultrakurzwellenausbreitung.

- Nr. 10: Fritz Béla Groissmayr, Die große säkulare Klimawende um 1940 und das Katastrophenjahr 1947 in Zentraleuropa.

# Die Arbeiten und Forschungsergebnisse der Wolkenforschungsstelle des Reichsamtes für Wetterdienst in Prag

Von Dr. Gerhard Schulz, Berlin

Im Herbst 1940 wurde die Wolkenforschungsstelle des Reichsamtes für Wetterdienst, die bis dahin eine Abteilung des Aerologischen Observatoriums in Friedrichshafen war, als selbständiges Forschungsinstitut in die Räume der Technischen Hochschule nach Prag-Dewitz verlegt. Durch diese Abtrennung erhielt die Wolkenforschungsstelle erheblich mehr Raum und die Möglichkeit, ein großzügig angelegtes Forschungsprogramm in Angriff zu nehmen. Durch die neuzeitlich eingerichteten Laboratorien und Werkstätten, sowie die ausschließlich der Forschungsstelle zur Verfügung stehenden drei Flugzeuge (Muster He 111, Ju 88, Do 215) war es möglich, Untersuchungen anzustellen, die bis dahin aus Raummangel und wegen unzureichender Mittel nicht durchgeführt werden konnten. Leiter der Forschungsstelle war während der ganzen Zeit ihres Bestehens Dr. habil. W. Findeisen. Das Arbeitsprogramm der Forschungsstelle umfaßte folgende Gebiete:

- I. Untersuchungen über Eisteilchen (Sublimationskerne).
- II. Versuche zum Problem der Vereisung.
- III. Elektrische Messungen an Wolken.
- IV. Temperaturmessungen vom Flugzeug aus.
- V. Entwicklung von Wolkenmeßgeräten.
- VI. Spezielle Wetterflüge (Frontenflüge, Alpenflüge).

Die wissenschaftlichen Mitarbeiter an der Wolkenforschungsstelle in Prag waren in den Jahren 1940/45 Dr. H. Böhm, O. Düttmann, Dr. H. W. Maaß, Dr. G. Schulz und B. Walliser.

Leider wurden dem Forschungsbetrieb durch kriegsbedingte Personaleinsparung bald erhebliche Beschränkungen auferlegt und durch den Ausgang des Krieges nicht nur den Untersuchungen ein Ende bereitet, sondern auch viel mühsam zusammengetragenes Versuchsmaterial und viele Ergebnisse vernichtet. In den folgenden Aufzeichnungen soll ein Bericht über die Arbeiten der Wolkenforschungsstelle gegeben werden, sowie erarbeitete, nicht zur Veröffentlichung gelangte Ergebnisse so gut als möglich festgehalten und mitgeteilt werden.

## I. Untersuchungen über Eisteilchen

Einen breiten Raum im Findeisenschen Forschungsprogramm nahmen die Untersuchungen über die Sublimationskerne ein; einmal, um seine Niederschlags- und Gewittertheorie<sup>1)</sup> auszubauen und zu stützen, andererseits aber auch, um die Möglichkeit einer technischen

Wetterbeeinflussung im Sinne künstlicher Niederschlagszerzeugung und Kondensfahnenverhinderung zu prüfen. Ausgangspunkt für diese Untersuchungen waren in erster Linie Flugzeugbeobachtungen zum Studium der Eisteilchen an Ort und Stelle. Über diese Flugbeobachtungen ist verschiedentlich berichtet worden.<sup>2), 3)</sup> Da diese Veröffentlichungen den Krieg nur in wenigen Stücken überstanden haben, werden sie ebenso wie die auf S. 13, 15 und 16 erwähnten, neu gedruckt und im Anhang beigegeben.

Zweck der Laboratoriumsuntersuchungen war sodann, die im Fluge beobachteten Erscheinungen künstlich nachzuahmen und durch planmäßige Abwandlung der Versuchsbedingungen ihre Gesetzmäßigkeiten zu ergründen, sowie Entstehung und Entwicklung der Eisteilchen zu studieren.

### a) Die Unterdruckapparatur.

(Versuche von G. Schulz)

Die erste für diese Zwecke erbaute Apparatur erzeugte Quellwolken durch Abkühlung und Expansion eines ca. 2 cbm großen Luftvolumens. Die mit dieser Apparatur gemessenen Zusammenhänge von Eisteilchenmenge, Temperatur und Steiggeschwindigkeit sind bereits veröffentlicht worden.<sup>3)</sup>

### b) Die Überdruckapparatur.

(Versuche von G. Schulz)

Während die Unterdruckapparatur ortsfest, beim Versuch also auf die am Versuchsort gerade vorhandenen Luftkörper angewiesen war, sollte eine zweite Quellwolkenapparatur es ermöglichen, durch beliebigen Ortswechsel, verschiedene Luftkörper mit Kernen verschiedenster Herkunft und Zahl zu untersuchen und an diesen die mit der ortsfesten Apparatur gefundenen Meßergebnisse zu prüfen bzw. zu erweitern. Die Apparatur arbeitete nach dem gleichen Prinzip wie die Unterdruckapparatur, nämlich Abkühlung eines großen Luftvolumens durch Expansion.

Auch bei dieser Anlage wurde getrachtet, eine größtmögliche Anpassung an die in der Natur gegebenen Verhältnisse zu erreichen. Da bei einer transportablen Apparatur die Vorkühlung des Versuchskessels durch die dazu nötige Kühlanlage eine zu große Belastung bedeutet, andererseits aber beim Arbeiten mit Unterdrücken die adiabatische Abkühlung bei der Expansion von einer Atmosphäre auf etwa 100 mm Hg keinen genügenden Effekt brachte, wurde bei dieser Apparatur mit Überdrücken bis zu 12 atü gearbeitet. Durch die Expansion von 12 auf 1 Atm. konnte man im Versuchskessel leicht Temperaturen erzielen, die 70 Grad unter der Laboratoriumstemperatur lagen, ohne daß eine Vorkühlung des Kessels vorgenommen werden

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 55, 121 (1938).  
desgl. Meteor. Z. 57, 201 (1940).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD., Reihe B, Nr. 8, 1942.

<sup>3)</sup> W. Findeisen u. G. Schulz, Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD., Reihe A, Nr. 27, 1944.

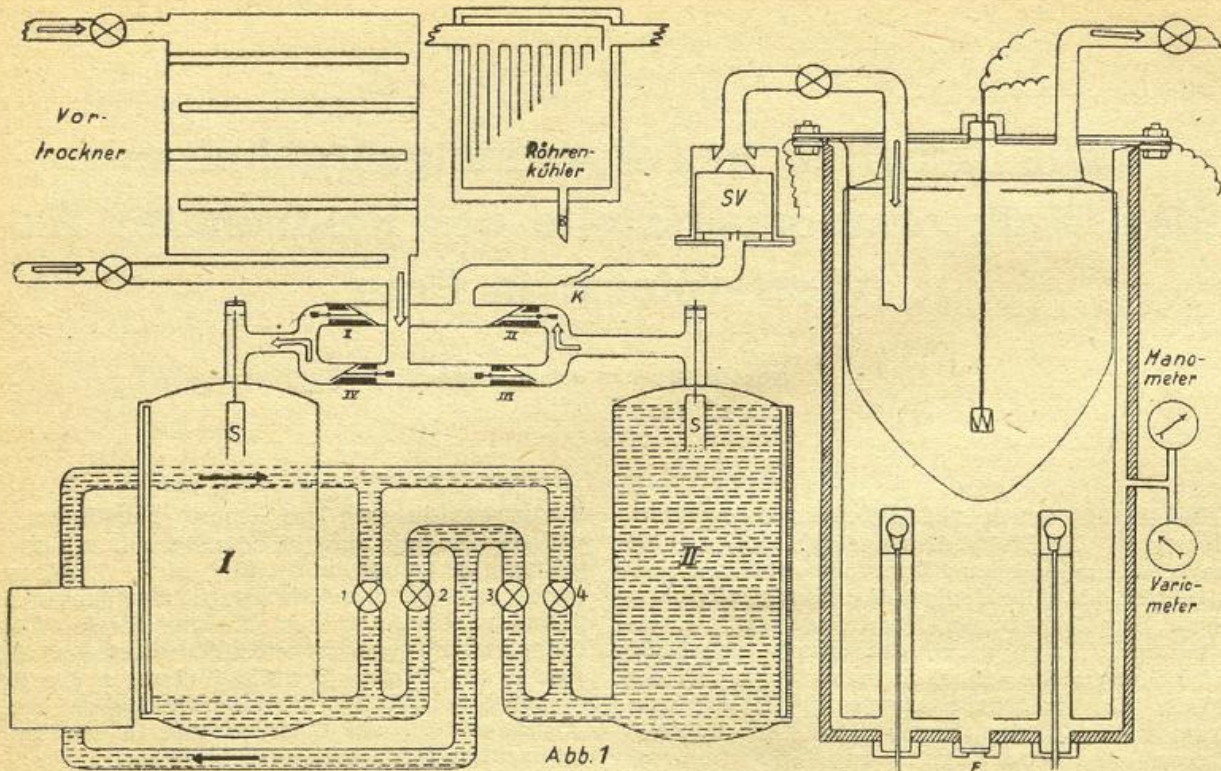


Abb. 1: Schema der Überdruckapparatur

mußte. Die Überdruckmethode hatte zudem den Vorteil, daß man kein so großes Luftvolumen für die Beobachtung — besonders bei geringen Kernzahlen — nötig hat, wie bei einer Unterdruckanlage, da ja das Luftvolumen komprimiert und damit auch die Teilchenzahl pro Volumeneinheit entsprechend erhöht wird und man selbst am Endpunkt der Expansion (1 Atm) noch mit normalen Kernzahlen rechnen kann.

Wie bei der Unterdruckapparatur besteht der eigentliche Versuchsraum der Überdruckanlage aus einem senkrecht stehenden Eisenkessel, der innen zur Abschwächung des Wärmezustroms von außen mit einer etwa 3 cm dicken Glaswollschicht ausgekleidet ist. Der eigentliche Beobachtungsraum wird in dem Eisenzylinder durch einen hineingehängten allseitig geschlossenen Zylinder aus 0,012 mm starker Aluminiumfolie gebildet. Im Boden und an den Seitenwänden der Folie angebrachte Löcher sorgten bei der Expansion für das Absaugen temperaturgestörter Luftschichten und störender Luftwirbel. Auf diese Weise hatte man auch während der raschen Expansionen in dem Aluminiumzylinder ein ruhig stehendes Luftvolumen mit nur geringfügiger Verwirbelung.

Der Kessel hatte bei einer Höhe von etwa 150 cm einen Durchmesser von 75 cm und einen Inhalt von etwa 0,65 cbm. Der Abstand der in den Kessel hineingehängten Aluminiumfolie von der isolierenden Glaswollschicht betrug allseitig etwa 5 cm, so daß das Innenvolumen des Aluminiumzylinders, der eigentliche Beobachtungsraum, etwa 0,4 cbm umschloß. Die Anlage der Apparatur ist in der Abb. 1 schematisch skizziert. Von unten ragten an 50 cm langen Rohren zwei Autolampen (6 V, 35 W) in den Aluminiumkessel hinein, um die Wolken, bzw. Eisteilchen zu beleuchten. Die Lampen sowie ihre Halterung waren mit 5 cm weiten Rohren aus Aluminiumfolie verkleidet, um störende turbulente Luftströmungen durch örtliche Strahlungsüberhitzung auf ein Mindestmaß herabzudrücken. Diese Verkleidung der Lampen gestattete außerdem, durch entsprechend seitlich in ihr angebrachte feine Schlitze Strahlenbündel auszublenken, so daß die Eisteilchen

senkrecht zur Beobachtungsrichtung, die in der vertikalen Kesselachse lag, beleuchtet wurden. Dieses Anleuchten der schwebenden Eisteilchen unter 90° zur Beobachtungsrichtung hat sich vielfach bewährt, da das Auge des Beobachters nicht durch direktes oder reflektiertes Licht geblendet wird und so die kurzfristigen charakteristischen Reflexe an den Eisteilchen gut aufnehmen kann. Die Beobachtung erfolgte in der Kesselachse durch das Fenster F des Kessels und eine ihm entsprechende Öffnung in dem Aluminiumzylinder, die durch eine Glimmerscheibe verschlossen war. Zur Vermeidung störender Lichtreflexe war der obere Deckel des Folienzylinders auf der Innenseite schwarz mattiert, so daß sich die Eisteilchen hell auf dunklem Untergrund abhoben. Die Temperatur in dem Kessel wurde mit 2 Platinwiderstandsthermometern gemessen, von denen eines, quer durch den Raum gespannt, eine Durchschnittstemperatur maß, während ein zweites, haspelförmig gewickeltes Thermometer die kleinräumige Temperaturverteilung zu messen gestattete, also Rückschlüsse auf eine eventuell auftretende Temperaturschwadigkeit der Luftmassen im Kessel zuließ. Die beiden Widerstandsthermometer benutzten das gleiche, in Temperaturgraden geeichte Brückengalvanometer, so daß man durch einfaches Umlegen eines Kommutators jederzeit die Temperaturverhältnisse im Kessel auf Schwadigkeit prüfen konnte. Ein direkt am Kessel angeschlossenes Manometer und Variometer ermöglichten eine genaue Kontrolle der Druckverhältnisse im Kessel. Durch ein mehr oder weniger weites Öffnen des Auslaßventils konnte jede beliebig rasche Druckabnahme, also jede beliebige „Steiggeschwindigkeit“, konstant einreguliert werden. Die Steiggeschwindigkeit wurde mit dem Variometer, das die Druckänderung in der Zeiteinheit angibt, gemessen. Mit der Messung des Ausdrucks  $\frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{p}$  hat man auch die Steiggeschwindigkeit, also die der zeitlichen Druckänderung entsprechende Höhenänderung, gemessen.

Die Füllung des Kessels mit Frischluft mußte sehr vorsichtig erfolgen, damit eine wirklich kernhaltige

und somit repräsentative Luftmasse in den Versuchsraum gelangte. Die Verwendung von Preßluft oder der handelsüblichen Kompressoren zur Erzeugung des nötigen Überdruckes im Kessel verbot sich aus diesem Grunde von selbst. Denn bei beiden wird die Luft durch die großen Strömungsgeschwindigkeiten, durch die die Kerne an die Rohrwandungen geschleudert werden, wo sie sodann hängen bleiben, der ursprünglich in ihr enthaltenen Kerne zum größten Teil beraubt. Ferner werden allerlei Verunreinigungen mitgerissen. Um dies zu vermeiden, wurde mit zwei je etwa 100 Liter fassenden Vorkesseln gearbeitet, die wechselweise mit der zu untersuchenden Frischluft gefüllt wurden. Die Luft wurde nach dem Einströmen aus den Vorkesseln mit Öl heraus- und in den Hauptkessel hinübergereißt. Die Rohr- und Hahndimensionen waren an der gesamten Apparatur so bemessen, daß an keiner Stelle der Zuführungsleitungen für die Frischluft Strömungsgeschwindigkeiten über 0,2 m/sec auftreten konnten.

Das zum Herauspressen der Luft aus den Vorkesseln benutzte Öl vollführte einen Kreislauf. Zum Transport diente eine durch einen Benzinmotor angetriebene Kreiselpumpe mit einer Leistung von etwa 400 Litern/min. mit einer Druckleistung bis zu 15 Atü. War der Vorkessel I z. B. mit Öl, der Vorkessel II mit Frischluft gefüllt, so wurde das Öl aus I in II hineingepumpt und die Luft aus ihm verdrängt. War dann II mit Öl gefüllt, erfolgte auf Warnsignal, das die Füllung mit Öl anzeigte, die Umschaltung, indem das Öl in den inzwischen mit Frischluft vollgesaugten Vorkessel I gepumpt wurde. Durch diese Ansaugmethode war es möglich, die Frischluft in den Hauptkessel zu pumpen, ohne daß sie eine Pumpe oder Kompressor passierte. Die Steuerung des Öl- und Luftstromes erfolgte mit 8 Ventilen, von denen die Ölventile 1, 2, 3, 4 von außen willkürlich und die Luftventile I, II, III, IV automatisch betätigt wurden. Durch eine Schubstange konnten die Ölventile 1—4 gleichzeitig schlagartig umgeschaltet werden, und zwar so:

**Schub I** auf: 1, 3, I, III  
zu: 2, 4, II, IV

**Schub II** auf: 2, 4, II, IV  
zu: 1, 3, I, III

Um ein Überfließen des Öls in den Versuchskessel zu verhindern, waren mehrere Sicherheitsvorrichtungen eingebaut, die bei Füllung der Vorkessel den Umschaltenden optisch und akustisch warnten bzw. selbsttätig den Kessel absperreten:

1. Ölstandgläser an jedem der Vorkessel;
2. Kontaktschwimmer S, die eine Alarmglocke und eine rote Signallampe bei mit Öl gefülltem Vorkessel betätigten;
3. Sicherheitsventil SV, das bei Ölüberlauf automatisch den Zufluß von Luft und Öl zum Versuchskessel sperrte und gleichzeitig ebenfalls eine optische und akustische Alarmanlage auslöste.

Die Ventile 1 bis 4 waren einfache Zweieinhalb-Zoll-Hahnventile mit großer Bohrung; I bis IV dagegen Klappventile mit Gegengewicht, die sich entsprechend der durch die Ventile 1 bis 4 erzeugten Strömungen selbsttätig öffneten oder schlossen.

Da der Wassergehalt der bei Laboratoriumstemperatur angesaugten Luft bei der Expansion sehr rasch das Kondensationsniveau erreichen ließ, was aber besonders bei Versuchen mit tieferen Temperaturen sehr störend war, mußte der Wasserdampfgehalt der angesaugten Luft gelegentlich erniedrigt werden. Zu diesem Zweck waren zwei Einrichtungen vorgesehen, die die Trocknung der Luft durch Trockenmittel oder durch Ausfrieren des Wasserdampfes bewirkten. Die erste Anordnung, der Vortrockner, konnte wahlweise in den Strom der angesaugten Luft eingeschaltet werden. Die

Luft strich darin über 5 übereinander angebrachte lange Schalen mit Trockenmittel, wie Calciumchlorid oder Phosphorpentoxyd. Ebenso diente der Trocknung und Abkühlung der durch die Kompression erwärmten Luft der bei K eingeschaltete Röhrenkühler. Dieser bestand aus einem druckfesten Eisenkasten, in den die Luft durch 7 oder 8 verschieden lange, der Größe nach geordnete Rohre, von 2 cm Durchmesser, strömte. Der Kasten konnte von außen mit einer Alkohol-Kohlensäure-Kältemischung auf jede beliebige Temperatur bis  $-80^{\circ}\text{C}$  vorgekühlt werden. Durch entsprechende Abkühlung des Röhrenkühlers konnte man aus der den Kühler passierenden Luft Wasser abscheiden und hatte es so in der Hand, den Versuchskessel mit einer Luft bestimmter Feuchtigkeit zu füllen.

Da die ganze Apparatur des öfteren den Standort wechseln sollte, war sie auf einem Stahlschienenagerippe so montiert, daß sie auf einer Grundfläche von etwa 2 mal 3 Metern stand, also bequem auf einem Lastkraftwagen verladen werden konnte. Zunächst aber wurde sie im Laboratorium aufgestellt und auf ihre Betriebsfähigkeit geprüft. Zu Fahrversuchen und Ortswechsel ist man nicht mehr gekommen.

Der Ablauf eines Versuches mit der Apparatur war etwa der folgende: Der Versuchskessel wurde mit Frischluft auf 6 bis 8 Atm. Überdruck gefüllt. Dies nahm meist 5 bis 7 Minuten in Anspruch. Mit dem Druck höher zu gehen, war zunächst nicht notwendig, da die adiabatische Expansion von diesen Drucken aus ohne Schwierigkeiten Temperaturniedrigungen auf  $-30$  bis  $-40^{\circ}\text{C}$  im Versuchskessel brachte. Wenn bei der Kompression der Luft ohne Vorkühlung gearbeitet wurde, erwärmte sich die Luft im Kessel auf  $+30$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$ . Bevor mit der Expansion begonnen wurde, ließ man meist einen Temperaturausgleich bis auf Laboratoriumstemperatur eintreten. Sobald dies erreicht war, wurde mit konstanter Steiggeschwindigkeit in den Stufen 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75 und 100 m/sec durch Öffnen der Auslaßventile expandiert. Da zunächst mit dieser Apparatur ebenfalls die Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Eisteilchenbildung von der Steiggeschwindigkeit geprüft werden sollte, wurde mit der gleichen Steiggeschwindigkeit solange gearbeitet, bis man durch die von Versuch zu Versuch tiefer gelegten Temperaturminima die genaue Grenze für das Auftreten der Eisteilchen festgelegt hatte. Die Art der Versuchsdurchführung entsprach also durchaus der beim Unterdruckkessel angewandten Methode.

Die Versuche mit dieser Methode sollten analog zu den Versuchen mit der Unterdruckapparatur zunächst die Untersuchung an den Sublimationskernen erster Art, später an denen zweiter Art wiederholen und durch Beobachtung bei großen Steiggeschwindigkeiten erweitern. Ferner sollte in späteren Versuchen durch Ortswechsel über größere Strecken untersucht werden, welche Unterschiede sich in den verschiedensten Luftmassen zeigen, indem man die Versuche an Meeresküsten, auf Inseln, im Hochgebirge oder inmitten größerer Kontinente wiederholte. Diese geplanten Versuche wurden nur zu einem kleinen Teil in die Wirklichkeit umgesetzt. Genauere Messungen konnten nur für den Bereich der Sublimationskerne erster Art durchgeführt werden. Das folgende Diagramm gibt die Ergebnisse dieser Versuche wieder (Abb. 2).

Man ersieht daraus, daß die mit dem Überdruckkessel gemessenen Werte recht gut mit den mit der Unterdruckapparatur festgestellten Grenzen der kritischen Temperaturen der Eisteilchenbildung übereinstimmen. Der Kurvenverlauf bleibt auch bei noch höheren Steiggeschwindigkeiten bis zu 40 m/sec im gleichen Sinne. Bei Steiggeschwindigkeiten über 50 m/sec tritt eine Wendung der Kurve ein, anscheinend sogar eine Um-

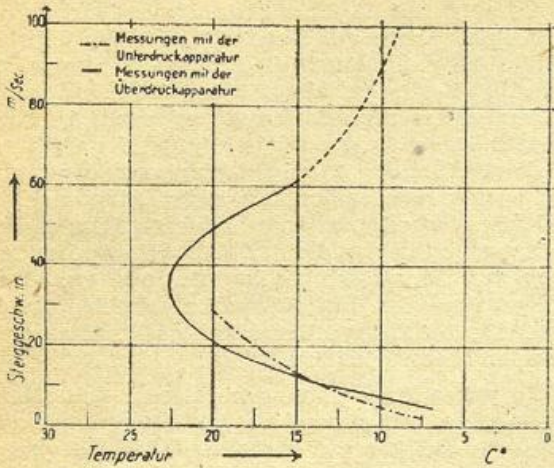


Abb. 2: Kritische Temperatur der Eisteilchenbildung bei verschiedenen Steiggeschwindigkeiten

kehr, d. h. bei Steiggeschwindigkeiten über 50 m/sec geht die Eisteilchenbildung wieder bei höheren Temperaturen vor sich. Die in diesem Bereich auftretenden Eisteilchen werden beträchtlich größer als die bei niedrigen Steiggeschwindigkeiten beobachteten Eisteilchen. Vermutlich hat es sich bei diesen Eisteilchen um Produkte gehandelt, die auf anderem Wege als dem der reinen Sublimation entstanden waren. Leider waren genauere, ausführlichere Messungen in diesem Bereich durch die Entwicklung des Krieges nicht mehr möglich. Die gezeichnete Kurve (letzte Werte vom Dez. 1944) gibt in dem Teil oberhalb von 40 m/sec nur ungefähre Werte, da die genauen Messungsergebnisse verloren gegangen sind.

Nach allem scheint aber bewiesen, daß die mit der Unterdruckapparatur gefundene Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Eisteilchenbildung von der Steiggeschwindigkeit reell ist. Ferner hat man die Bestätigung dafür, daß man mit dieser Überdruckapparatur die geplanten Untersuchungen in den verschiedenen Luftmassen durchführen kann und dabei untereinander vergleichbare Werte erhält.

### c) Die Schichtwolkenapparatur

(Versuche von O. Düttmann)

Das Studium der Eisteilchenbildung in Schichtwolken in der Natur vom Flugzeug aus stößt im allgemeinen wegen der räumlich weiten Erstreckung und meist relativ geringen Dichte dieser Wolken auf größere Schwierigkeiten, als die schon schwierigen Beobachtungen an Quellwolken. Deshalb wurde auch im Laboratorium der Versuch unternommen, ebenso wie den Quellwolkenvorgang, auch den Schichtwolkenvorgang künstlich nachzuahmen und durch Variation der äußeren Versuchsbedingungen nach ähnlichen Zusammenhängen wie bei Quellwolken zu suchen. Es brauchen dazu nur die Lufttemperatur und Luftfeuchte variiert zu werden, da ja der Druck konstant bleibt. Auch bei dieser Apparatur wurde angestrebt, den natürlichen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen. Der Beobachtungsraum war wiederum ein etwa 2 cbm fassender, aufrechtstehender Blechkessel, der gegen Wärmestrom von außen mit einer etwa 15 cm starken Glaswollschicht und einer zweiten Blechhülle geschützt war. Der obere Teil des Kessels, etwa 50 cm, war abnehmbar. Das Innere des Kessels wurde des öfteren mit Lackfarbe gestrichen, um Fälschungen durch losgelösten Rost oder dergleichen zu vermeiden. Abb. 3 gibt schematisch einen Längsschnitt durch diesen Kessel wieder. Die Luft in dem Versuchskessel wurde

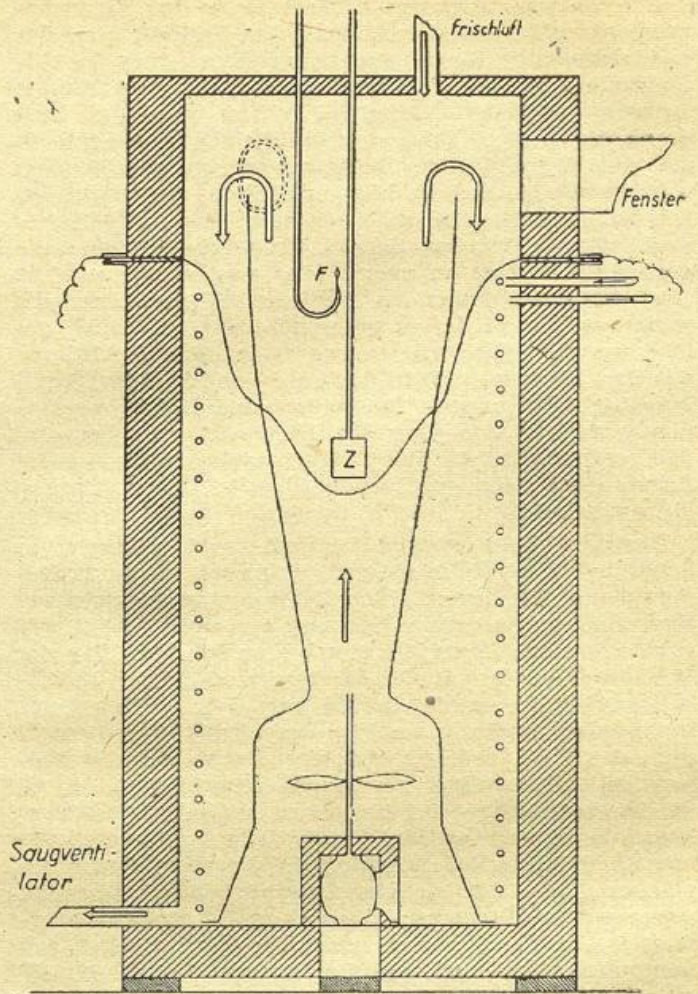


Abb. 3: Schema der Schichtwolkenapparatur

anfangs durch eine Gummischlauchspirale, durch die kalter Methylalkohol gepumpt wurde, abgekühlt. Nach den Vorversuchen wurde diese Spirale aus Sauberkeitsgründen und zur besseren Ausnützung der Kältemischung, durch eine Kupferrohrspirale ersetzt. Die Abkühlung des Methylalkohols wurde erreicht, indem man ihn durch eine zweite Kupferrohrspirale leitete, die in einem wärmeisolierten Kältebad (Mischung von Methylalkohol und fester Kohlensäure) bis zu  $-80^{\circ}\text{C}$  abgekühlt werden konnte. Der Kreislauf des Alkohols wurde durch eine für die tiefen Temperaturen eingerichtete Kreislumpumpe mit einer Leistung von etwa 50 Liter/min. bewirkt. Da man sowohl die Kühlzeit als auch die Temperatur des Methylalkohols genau einstellen konnte, war jede beliebige Temperatur bis etwa  $-50^{\circ}\text{C}$  in dem Versuchskessel herzustellen. Wesentlich schwieriger war es, die Feuchte in einer den natürlichen Verhältnissen einigermaßen entsprechenden Weise zu variieren. Versuche mit Verdampfen ergaben viel zu dichte Wolken, sehr starke Temperaturschwadigkeit und somit keine vergleichbaren Verhältnisse. Am besten bewährte sich Zerstäuben von kaltem Wasser mit einem Regener-Zerstäuber (Z) oder Einblasen filtrierter feucht gesättigter Luftmassen. Der Luftwechsel in dem Kessel konnte durch 2 Ventilationsöffnungen, eine im Deckel zur Zufuhr frischer Luft mit einem durch die Laboratoriumsdecke bis in die freie Luft reichenden Luftschacht, und eine zweite am Boden des Kessels, zum Absaugen der Luft, durch einen Saugventilator erfolgen. Die Fenster zur Beobachtung und Beleuchtung sowohl senkrecht als auch von schräg vorn zur Blickrichtung, waren im oberen abnehmbaren Kesselteil angebracht.

Bei einer Abkühlung der Luft im Kessel würde die schwere kalte Luft sich im unteren Kesselteil sammeln und man hätte kaum die Möglichkeit eine Mischung, Bewegung oder dergleichen mit ihr vorzunehmen, oder es würde beim Versuch zu starker Turbulenz kommen, so daß keine zweckentsprechende Beobachtung zustande käme. Aus diesem Grunde wurde in den Kessel unten ein Ventilator und darüber eine Windkanaldüse eingebaut. Mit dieser Einrichtung konnte man eine ziemlich ruhige laminare vertikale Strömung herstellen. Der obere Düsenrand ragte in das Blickfeld der Beobachtungsfenster hinein, so daß die Vorgänge an der Mischungsgrenze der von unten langsam emporgedrückten Kaltluft mit der im oberen Kesselteil befindlichen, relativ warmen Luft, beobachtet werden konnte. Wie die beiden anderen beschriebenen Apparaturen, hatte auch diese Anlage den Nachteil, daß man auf die zur Versuchszeit am Versuchsort gerade anwesenden Luftmassen mit ihren Suspensionen angewiesen war und nicht durch Versuche an verschiedenen Orten sich die Luftmassen aussuchen konnte.

Mit dieser Schichtwolkenapparatur wurden zunächst ausgedehnte Versuche zum Studium der Verteilung wirksamer Sublimationskerne auf den Temperaturbereich (Sublimationskernspektrum) sowie der täglichen Änderung des Spektrums angestellt. Diese Versuche wurden folgendermaßen durchgeführt:

Nachdem die Luft in dem Versuchskessel durch längeres Ventilieren gründlich erneuert und der Kessel dabei gleichzeitig tief genug gekühlt war, wurde kurze Zeit gewartet, bis die Luft in ihm eine bestimmte konstante Temperatur angenommen hatte. Sodann erfolgte mit Hilfe des Vertikalwindkanals eine Mischung und Hebung der kalten Luftmassen unter gleichzeitiger Sättigung bzw. Übersättigung mit Wasserdampf durch den Zerstäuber (Z). An der oberen Düsenmündung entstand dann eine Schichtwolkenzone mit leichter Turbulenz, in der man durch eine seitliche Beleuchtung die gebildeten Eisteilchen, die sich durch ein charakteristisches Glitzern einige Zeit nach ihrer Entstehung anzeigen, beobachten konnte. Die Temperatur des langsam aufsteigenden Luftstromes ist durch Messung mit einem Platinwiderstandsthermometer sowie einem auf Zehntel Grad geeichten, in den Sirom gehängten Quecksilberthermometer hinreichend genau bekannt. Ein weiteres gleiches Thermometer war in der Mischungszone aufgehängt.

Die Bestimmung der Teilchenzahl ist zunächst schwierig, aber der erfahrene Beobachter kann durch Schätzungsübung die Teilchenzahl doch mit einer Genauigkeit angeben, die für den Rahmen dieser Versuche durchaus hinreicht. Zur Erleichterung der Schätzung war neben dem Beobachtungsfenster auf dunklem Feld mit weißen Punkten, deren Größe etwa den Lichtscheibchen der Eisteilchen entsprach, eine Skala angebracht, auf der die Teilchendichten 50, 300, 500, 1000, 2000, 5000 und 10 000 Teilchen/Ltr. aufgezeichnet waren.

Durch einen raschen Seitenblick auf diese Skala konnte der Beobachter in Zweifelsfällen einen ungefährten Anhaltspunkt für seine Schätzungen bekommen. Auf diese Weise dürften die mittleren Schätzungsfehler 200% kaum überschritten haben.

Nachdem für eine bestimmte Temperaturstufe die Teilchenzahl hinreichend oft und sicher bestimmt war, wurde die Temperatur gesenkt und bei dieser tieferen Temperatur die Kernzahl auf gleiche Weise ermittelt. So wurde der gesamte Temperaturbereich von 0 bis  $-50^{\circ}\text{C}$  abgetastet. Hierbei ist zu bemerken, daß die Einhaltung der tieferen Temperaturen unter  $-40^{\circ}\text{C}$  wegen des Wärmezustroms von außen wesentlich schwieriger war, als über  $-40^{\circ}\text{C}$ , wo die durch die Kühlleitung abgenommene Wärme von außen nicht so schnell ersetzt werden konnte. Diese Art der Bestimmung des

Kernspektrums wurde in den verschiedensten Jahreszeiten und bei verschiedenen Wetterlagen wiederholt. Man darf daher annehmen, einen Mittelwert gemessen zu haben, wenn man auch durch die ortsfeste Anlage darauf angewiesen war, die jeweils in der nächsten Umgebung des Versuchsortes befindlichen Luftmassen zu benutzen. Diese waren zwar zum Teil durch den Stadteinfluß — die Apparatur stand in dem Stadtteil Prag-Dewitz 225 m über NN und 30 m über dem Stadtniveau von Prag — beeinflusst. Jedoch stimmten die Beobachtungen untereinander überein. Auch mit den Ergebnissen, die mit der völlig anders gebauten Quellwolkenapparatur erzielt wurden, herrschte gute Übereinstimmung, so daß man die Messungen mit der Schichtwolkenapparatur schon als repräsentativ ansehen kann, wenn auch von einer gemessenen Abhängigkeit des Kernspektrums von bestimmten Luftmassen nicht die Rede sein kann.

#### Ergebnisse der Messungen mit der Schichtwolkenapparatur:

1) Es ist mit der Versuchsanordnung gelungen, sowohl Wasser-, Misch- und reine Eiswolken als Schichtwolken herzustellen. Wie in der Natur, so trat auch im Versuch bei Mischwolken eine Umwandlung in reine Wasserwolken durch Ausfallen der wenigen Eisteilchen oder in reine Eiswolken durch rasches Wachsen der Eisteilchen auf Kosten der Wassertröpfchen ein; letzteres vorwiegend bei tieferen Temperaturen durch die hohe Eisübersättigung in Wasserwolken. Die Fall- und Bewegungsgeschwindigkeit der Eisteilchen war meist so klein, daß ein Abzählen bzw. Schätzen der Menge gut möglich war.

2) Die Grenztemperaturen für den Einsatz der Eisteilchenbildung, ebenso wie die Zahl der Eisteilchen waren erheblichen täglichen Schwankungen unterworfen. Als Untergrenzen wurden Temperaturen zwischen  $-3$  und  $-18^{\circ}\text{C}$ , mit Häufung im Bereich  $-6$  bis  $-12^{\circ}\text{C}$  gefunden. Unterhalb dieser Einsatztemperaturen stieg die Zahl der Teilchen d. h. die Zahl der wirksam werdenden Kerne mit sinkender Temperatur an, um in dem Bereich  $-28^{\circ}$  bis  $-35^{\circ}\text{C}$  unvermittelt ganz erheblich anzusteigen. Auch diese Grenze ist täglichen Schwankungen unterworfen. Die folgende Abbildung (Abb. 4) gibt einen Mittelwert aus einer großen Anzahl von Messungen wieder. Ein einheitlicher Zusammenhang zwischen der Verschiebung der kritischen Temperatur für die Bildung der Teilchen erster Art und der Teilchen zweiter Art und der Wetterlage ließ sich nicht einwandfrei feststellen.

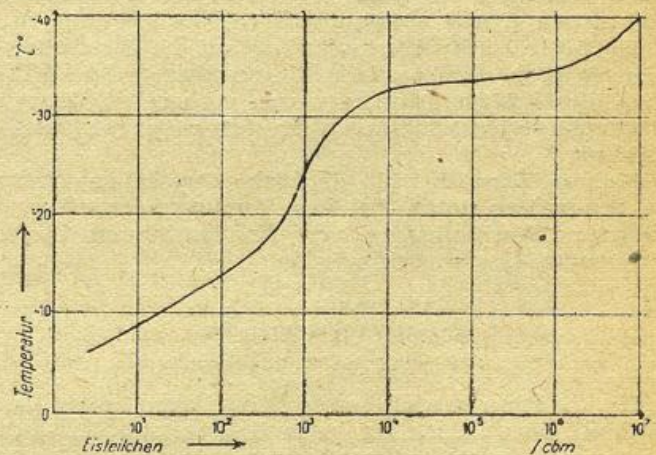


Abb. 4: Zahl der Eisteilchen pro Kubikmeter bei wechselnden Temperaturen (Kernspektrum)

Für die Darstellung des Sublimationskernspektrums könnte man entsprechend wie Chr. Junge<sup>1)</sup> als Ordinate auch die Übersättigung wählen. Da diese jedoch bei den gewählten Versuchsanordnungen schwer zu bestimmen waren, wurde die kritische Temperatur d. h. die Temperatur, bei der ein Teilchen als Sublimationskern wirksam wird, gewählt.

3) Die Gründe für die täglichen Änderungen der Kernspektren dürften in jedem Fall auf den schwankenden Kerngehalt der für die Versuche benutzten Luftmassen zurückzuführen sein. Die Veränderungen sind also vorwiegend durch die Wetterlage bedingt. Jedoch ließ sich in dieser Richtung kein eindeutiger Zusammenhang feststellen, da die möglicherweise vorhandenen Unterschiede vielleicht durch den örtlichen Stadteinfluß überdeckt waren.

4) Daß die in den künstlich erzeugten Wolken beobachteten Eisteilchen durch irgendwelche in der Luft enthaltenen Suspensionen bedingt waren, geht aus folgenden beiden Beobachtungen hervor. Wenn man in dem abgeschlossenen Kessel Luft einige Tage stehen läßt, dann abkühlt und Wolken erzeugt, kommt es meist zu keiner Eisteilchenbildung, selbst nicht bei tieferen Temperaturen; die Anreger der Eisteilchenbildung fehlen offenbar — sie sind ausgefallen oder haben sich an den Behälterwänden abgesetzt. Den gleichen Vorgang kann man beobachtend verfolgen, wenn man den Kessel z. B. längere Zeit auf einer bestimmten Temperatur hält und Wolken erzeugt. Zunächst kann man die der Temperatur etwa entsprechende Eisteilchendichte beobachten. Im Laufe der Zeit aber fallen die Eisteilchen aus und es bleibt die unterkühlte Wolke übrig. Die Kerne haben sich offenbar verbraucht, d. h. sie sind mit Eis beladen infolge ihrer Schwere zu Boden gefallen und für die weitere Eisteilchenbildung verloren.

5) In so einem, von Sublimationskernen freien Luftvolumen kann man sofort die Eisteilchenbildung hervorrufen, indem man kernhaltige Frischluft einbläst oder die unterkühlte Wolke mit irgendwelchen festen Kernen impft. Hierzu wurde fein zerstäubtes Kieselgur benutzt. Die Eisteilchenbildung an den Impfkernen aus Kieselgur setzte jedoch erst bei tieferen Temperaturen ein, als bei normalkernhaltiger Luft. Das kann den Grund haben, daß das Kieselgur ungeeignet war (Kristallstruktur, Oberfläche) oder die Teilchen waren zu grob und hatten eine zu große Sinkgeschwindigkeit, so daß während ihres Verweilens im Beobachtungsfeld die begonnene Sublimation nicht wahrgenommen werden konnte, und erst bei größerer Eisübersättigung durch die schnellere Anlagerung und das damit verbundene raschere Wachstum zu beobachten war.

Zu bemerken ist noch in diesem Zusammenhang, daß in den Kessel gestäubtes Nordseewasser aus der Helgoländer Bucht keinen Einfluß auf die Eisteilchenbildung hatte. Systematische Untersuchungen zur Klärung dieser Meßergebnisse waren vorbereitet, kamen wegen der Kriegsergebnisse aber nicht mehr zur Durchführung.

Weitere Versuche mit der Schichtwolkenapparatur werden weiter unten bei den Versuchen zur Erzeugung und Verhinderung von Kondensfahnen hinter Flugzeugen beschrieben werden.

#### d) Becherglasversuche.

(Versuche von W. Findeisen)

Die bis dahin beschriebenen Apparaturen hatten den Nachteil, durch einen zu ihrem Betrieb erforderlichen großen technischen Aufwand kaum ortsveränderlich zu

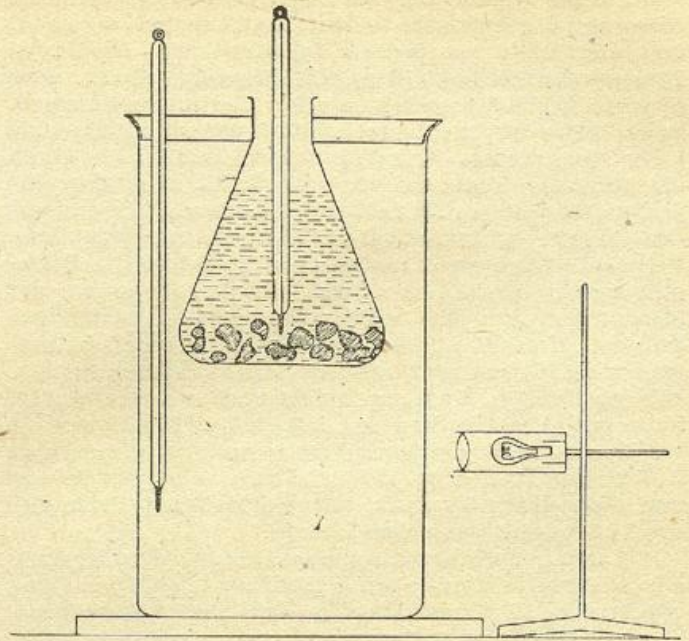


Abb. 5: Schema des Becherglasversuchs

sein. Auch die Überdruckapparatur hätte, obwohl als bewegliche Anlage konstruiert, in dieser Hinsicht voraussichtlich nicht unerhebliche Schwierigkeiten bereitet. Um an verschiedenen Orten schnell orientierende Untersuchungen über den Eisteilchengehalt (Sublimationskernspektrum) anzustellen, war eine einfache Anordnung erprobt worden, die ein einigermaßen anschauliches Bild über den Kerngehalt einer Luftmasse zu erhalten gestattet<sup>1)</sup>.

Auf einer wärmeisolierten Platte stand ein 4—5 Liter fassendes Becherglas (Durchmesser ca. 15 cm, Höhe ca. 25 cm). Dieses war mit einem Deckel aus Holz oder Hartgummi fest abgedeckt. In dem Deckel war eine luftdichte Halterung für ein in Zehntel Grade geteiltes Abmann-Thermometer, sowie einen etwa 300 ccm fassenden Erlenmeyerkolben eingebaut. Eine Lampe mit Kondensator durchleuchtete den Raum unterhalb des Kolbens. Wenn man den Erlenmeyerkolben mit Trockeneis und Alkohol beschickt und seinen Boden durch Bestreichen mit Glyzerin oder dergleichen gegen Bereifung schützt, kann man bei geeigneten tiefen Temperaturen in dem Raum unter dem Kolben die Bildung von Eisteilchen beobachten. In dem Becherglas findet eine Luftzirkulation statt, indem die Luft an den relativ warmen Außenwänden des Glases emporsteigt, an dem tiefgekühlten Erlenmeyer abgekühlt wird und im Inneren des Glases zu Boden sinkt. Beim Vorbeistreichen an dem Kühlkolben erreicht die Luft je nach dessen Temperatur die erforderliche tiefe Temperatur für die Eisteilchenbildung und die in ihr enthaltenen Sublimationskerne kommen zur Wirksamkeit. In den Konvektionströmen in dem unteren Teil des Becherglases läßt sich bei seitlicher Beleuchtung deutlich das Funkeln der gebildeten Eisteilchen beobachten. Die Temperatur in dem Kühlkolben konnte durch entsprechende Trockeneisgaben reguliert werden und damit auch die Temperatur in dem Beobachtungsraum. Auf diese Art wurde ebenfalls das Sublimationskernspektrum bestimmt, allerdings mit dem einen Nachteil, daß man den ersten Teil, d. h. den Teil oberhalb — 20° C nicht oder nur ungenau erfaßte, da der Beobachtungsraum für die in diesem Bereich immerhin sehr geringen Kerndichten bei normalem Druck zu klein

<sup>1)</sup> Meteor. Z. 52, 467 (1935), Gerlands Beiträge, 46, 108 (1936).

<sup>1)</sup> Die Beschreibung der Anordnung ist angekündigt bei W. u. E. Findeisen, Meteor. Z. 60, 145 (1943).

war, so daß nur selten Teilchen auftraten, und diese Teilchen vielleicht noch oft der Beobachtung entgingen. Unterhalb von  $-20^{\circ}\text{C}$  bekam man aber aus einer größeren Reihe von Versuchen reproduzierbare, unter sich übereinstimmende Ergebnisse. Diese Versuche eigneten sich durchaus zur Orientierung und Demonstration. Der Vorteil der Apparatur liegt in ihrer leichten Beweglichkeit, so daß man mit ihr recht schnell — wenn auch nur in groben Zügen — Kernspektren verschiedener Luftmassen an verschiedenen Orten zu untersuchen imstande ist. Aus Zeit- und Personalmangel sind jedoch diese Versuche ebenfalls nur auf Prag beschränkt geblieben.

Mit dieser Anordnung wurden zum ersten Mal auf einfachste Art, unter Versuchsbedingungen, die den in der Natur gegebenen Verhältnissen weitgehend entsprechen, Eisteilchen künstlich hergestellt. Die Messungen hatten qualitativ Anschluß an die Messungen mit den großen Kesseln (s. S. 6/7). Wenn sie auch nicht zu planmäßigen, fundamentalen Untersuchungen geeignet waren, so ließen sich doch mit ihrer Hilfe wertvolle Aufschlüsse über den Kerngehalt und das verschiedene Verhalten der Kerne gewinnen.

**e) Splitterversuche.**

Untersuchungen über die elektrische Tönung der Vergraupelung, Bereifung und Ablösung von Eissplittern hatten mit den Zusammenstellungen über „Die Entstehung der Gewitterelektrizität“<sup>1)</sup> sowie „Eissplitterbildung an Reifschichten“ einen vorläufigen Abschluß gefunden. Die Versuche, Apparaturen und Meßergebnisse auf diesem Gebiet sind in den angeführten Veröffentlichungen genau beschrieben und besprochen worden.

**f) Unterkühlungsversuche.**

(Versuche von G. Schulz)

Im Rahmen der Diskussion über den Mechanismus der Sublimation und der Natur der Sublimationskerne tauchte immer wieder die Parallelfrage auf: Wie verhält sich unterkühltes Wasser zu den verschiedensten Arten von Verunreinigungen, die als Kristallisationskerne wirken? Das vorhandene reichhaltige Versuchsmaterial hat jedoch kaum einen Anhaltspunkt für die Beantwortung dieser Frage liefern können, da die Problemstellung eine andere war. Das Versuchsmaterial war ziemlich uneinheitlich und untereinander wenig vergleichbar. Wenn man sich auch von Anfang an im klaren sein mußte, daß man mit den Ergebnissen von solchen Unterkühlungsversuchen nicht den Mechanismus der atmosphärischen Sublimation klären konnte, so schienen dennoch systematische Versuche in mehr als einer Hinsicht erforderlich. Es wurden reinstem Wasser nach Struktur, Oberfläche und Löslichkeit verschiedene Stoffe zugesetzt und deren Einfluß auf die Unterkühlungsfähigkeit des Wassers untersucht. Diese Versuche mit ihren Ergebnissen sind ausführlich von G. Schulz<sup>2)</sup> beschrieben worden.

**g) Vorversuche zu einer technischen Wetterbeeinflussung.**

(Versuche durchgeführt von W. Findelsen, G. Schulz und B. Walliser.)

In Anwendung der aus den mit den Quellwolken-, Schichtwolken- und Unterkühlungsversuchen gewonnenen Erkenntnisse wurden Versuche unternommen, vom

Flugzeug aus mit künstlichen Kernen bei geeigneten Wetterlagen in unterkühlten Wolken Eisteilchenbildung und damit Niederschlag, bzw. Fallstreifen auszulösen. Nach den statistischen Ermittlungen von W. Peppeler<sup>3)</sup> sowie zahlreichen Beobachtungen bei Forschungsflügen findet man vielfach bis zu  $-12^{\circ}\text{C}$  in der Atmosphäre reine Wasserwolken, aus denen trotz hinreichender Wolkendichte kein nennenswerter Niederschlag aus Mangel an geeigneten Kernen fällt. Mit Hilfe von künstlichen Sublimationskernen, deren kritische Temperatur der Wirksamkeit im Bereich von  $-6^{\circ}$  bis  $-8^{\circ}\text{C}$  liegt, mußte es nach den vorliegenden Versuchsergebnissen möglich sein, durch Impfen solcher unterkühlter Wasserwolken aus diesen Niederschlag bzw. Fallstreifen hervorzurufen. Für diese Vorversuche waren geeignete Wetterlagen ziemlich selten. Außer den geeigneten eisteilchenfreien Wasserwolken durften keine weiteren Wolken, besonders über den zu impfenden Wolken, vorhanden sein, damit die Versuchsergebnisse nicht etwa durch von diesen gelieferte Eisteilchen gefälscht wurden. Ferner mußte einem Bodenbeobachter durch gute Sicht und Wolkenlosigkeit unterhalb der Versuchswolke die Möglichkeit gegeben sein, das impfende Flugzeug zu dirigieren und die Versuchsauswirkungen zu beobachten und eventuell photographisch festzuhalten. Alle diese Faktoren, zusammen mit den ungünstigen Zeitverhältnissen, ließen in den Jahren 1942/44 nur einige Male für die Versuche günstige Lagen eintreten. Besonders eindrucksvoll verlief ein Impfversuch über Prag im September 1942. Der Himmel war an diesem Tage nachmittags zu insgesamt  $\frac{5}{10}$  bedeckt, davon  $\frac{3}{10}$  bis  $\frac{4}{10}$  Ac-Felder in etwa 3000 bis 3500 m NN, darunter wenig Haufbewölkung in 1500 bis 2000 m NN. Sonst wolkenlos. Sicht 10 bis 15 km. Die Ac-Bänke bestanden aus reinen Wasserwolken von 200 bis 300 m Mächtigkeit. Beim ersten Einflug in eine charakteristische Ac-Bank wurde in dieser eine Temperatur von  $-8,5^{\circ}\text{C}$  gemessen. Darauf wurde die gleiche Wolkenbank ein zweites Mal angefliegen und durch Zerstäuben von Poliertripel (Hauptbestandteil Kieselgur) geimpft. Einige Minuten nach dem Impfen zeichnete sich in der Wolke auf der ungefähren Flugzeugspur ein deutlich heller Streifen ab, zugleich begann die Wolke sich auf dieser Spur aufzulösen und zu zerteilen, um schließlich unter Hinterlassung eines Fallstreifens ganz zu verschwinden. Die Tendenz der Auflösung bestand auch bei den anderen Ac-Bänken, erfolgte aber bei diesen bedeutend lang-

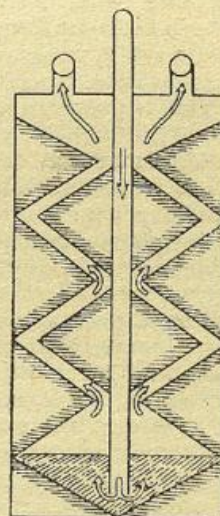


Abb. 6: Schema des Zerstäubers

<sup>1)</sup> W. Findelsen, Meteor. Z. 57, 201 (1940).

W. u. E. Findelsen, Meteor. Z. 60, 145 (1943).

<sup>2)</sup> G. Schulz: Der Einfluß von Fremdkörpern auf die Unterkühlungsfähigkeit des Wassers, Meteor. Rundschau 1, (1947).

<sup>3)</sup> W. Peppeler, Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD, Reihe B Nr. 1 (1940).

samer und, was wesentlich ist, ohne Fallstreifenbildung. Wie weit die beim Durchflug der Wolke erzeugte Turbulenz Anteil an der Beschleunigung der Auflösung hatte, konnte nicht geprüft werden. Die Fallstreifen dürften aber von den Impfkernen herrühren und nicht durch die Verbrennungsprodukte des Motors hervorgerufen worden sein, da nach dem ersten Durchfliegen der Wolke, wobei nicht geimpft wurde, keine Fallstreifen zu beobachten waren. Jedoch fehlen bei dem Versuch Identitätsbeweise, die man durch Auffangen der Eisteilchen der Fallstreifen und mikroskopische Untersuchungen der Impfkern (charakteristische Formen der Kieselsäureskelette) hätte erbringen müssen. Auch bei späteren Versuchen im Alpenvorland ergaben sich ähnliche, leider nicht eindeutige Ergebnisse, da die geimpften Wolkenfelder aus technischen Gründen oft sehr weit vom Bodenbeobachter entfernt oder durch tiefere Wolkenfelder verdeckt waren.

Für das Zerstäuben der künstlichen Kerne war in den benutzten Flugzeugen eine besondere Vorrichtung, die eine gründliche Suspendierung der Teilchen gewährleisten sollte, eingebaut. Für die Versuche wurden Flugzeuge vom Muster He 111 benutzt. Der „Zerstäuber“ (s. Abb. 6) bestand aus einem Blechkessel von ca. 120 cm Höhe und 50 cm Durchmesser. Damit die Teilchen gut aufgewirbelt wurden, war in dem Kessel ein System von Einlagen eingebaut. Als Druckluft für die Zerstäubung wurde der Flugzeugstau benutzt. Durch ein Blechrohr mit 50 mm Durchmesser wurde die Luft bis zum Kesselboden, der mit dem zu zerstäubenden Gut bedeckt war, geleitet. Das Abblasen erfolgte durch zwei in zur Flugrichtung entgegengesetzt geöffnete Rohre mit ebenfalls 50 mm Durchmesser. Die ganze Anordnung war in dem hinteren Rumpfteile des Flugzeuges eingebaut.

#### h) Kondensfahnenversuche.

(Versuche von B. Walliser u. G. Schulz)

Wenn in der Atmosphäre zur Kondensation oder Eisteilchenbildung geeignete Vorbedingungen herrschen, genügen kleinste Anstöße, dieselben auszulösen. Es kann dabei zur Bildung einer reinen Wasserwolke, Mischwolke oder reinen Eiswolke kommen, je nachdem die Temperatur- und Kernverhältnisse die Voraussetzungen dazu geben. Besonders eindrucksvoll kommen diese Vorgänge bei der Bildung von Kondensfahnen hinter Flugzeugen in wolkenfreiem Raum zum Ausdruck. Die Wasserfahne, die wesentlich schlechter sichtbar ist als die oft viele Kilometer lange, sichtbare Eisteilchenfahne, hat allgemein weniger interessiert als die Eisfahne, die aus taktischen Gründen sehr oft unerwünscht war, aber vielfach nicht vermieden werden konnte, da eine bestimmte Flughöhe eingehalten werden mußte. Nach den Versuchen an den Sublimationskernen mußte es möglich sein, Abhilfe zu schaffen. Wenn man auch auf die gegebenen atmosphärischen Verhältnisse keinen Einfluß ausüben konnte und eine Beseitigung der Verbrennungsprodukte der Motoren ebenso unmöglich war, so hatte man doch Aussicht, die Entstehung der Eisteilchenfahne zu verhindern und es nur zu der weniger sichtbaren Wasserfahne kommen zu lassen. Alle Versuche und Maßnahmen hierzu gründeten sich auf die Sublimationskerntheorie von W. Findeisen. Wenn es gelang, die von den Verbrennungsprodukten der Motoren gelieferten Sublimationskerne in ihrer Wirksamkeit zu beeinträchtigen, also eine Sublimation zu verhindern, wäre es auch möglich, die Kondensfahnen entsprechend zu beeinflussen. Aus verschiedenen Vorversuchen hatte sich ergeben, daß die Oberflächenbeschaffenheit der Sublimationskerne für ihre Wirksamkeit eine große Rolle spielt und sehr leicht zu beeinflussen ist. Es hatte sich u. a. auch bei

den Becherglasversuchen gezeigt, daß die Anwesenheit von Alkohol-, Salzsäure- oder Schwefeldioxyddämpfen in dem Beobachtungsraum die Eisteilchenbildung praktisch unmöglich macht. Diese Beobachtung war nur dadurch zu erklären, daß diese Dämpfe an der Oberfläche der Sublimationskerne absorbiert werden, dort hygroskopische Häute bilden und die Sublimation verhindern, also nur eine Kondensation zulassen.

Dementsprechend wurde versucht, die Kerne durch Überziehen mit irgendwelchen hygroskopischen Stoffen für die Sublimation unbrauchbar zu machen, also Eiswolkenbildung zu verhindern. Im wesentlichen bediente man sich zu diesen Versuchen der bereits beschriebenen Apparaturen.

Als erstes sollten genau die Entstehungs- und Existenzbedingungen für Kondensfahnen untersucht werden. Diese Versuche wurden in der Schichtwolkenapparatur vorgenommen. In einer kalten, nahezu wasserdampfgesättigten Atmosphäre wurden Flammen verschiedenster Art gebrannt und an ihren Abgasen die Kondensfahnenbildung studiert. Leider konnte man in der Anordnung nicht unmittelbar Motorabgase benutzen, da ihre Zuführung von außen durch Rohrleitungen die natürlichen Verhältnisse völlig abänderte; und direkt konnte man einen Motor nicht in den Kessel setzen, da die von ihm abgegebenen Wärmemengen für die Dimensionen des Kessels viel zu groß waren. So mußte man sich damit begnügen, Flämmchen von Wasserstoff, Benzin, Benzol, verschiedenen Alkoholen, Azetylen, Leuchtgas und Kohlenwasserstoffen (Stearinkerzen) anzuzünden und an ihnen das Entstehen von Kondensfahnen, d. h. den Eisteilchenschleier über ihnen, zu beobachten. Bindende Rückschlüsse auf die atmosphärischen Entstehungsbedingungen gestatteten diese Versuche nicht. Sie waren zum Schluß nur noch dazu gedacht, überhaupt Kondensfahnen zu erzeugen und an diesen die Wirkung von Zusatzgasen zu studieren.

Durch den Deckel des Kessels wurde ein Rohr (s. Abb. 3) geführt, das in einer feinen brennerartig geformten Düse endete. Das Rohr war außen mit einer Heizwicklung versehen und konnte somit stets so warm gehalten werden, daß die zugeleiteten Gase nicht kondensierten oder gar einfroren. Durch dieses Rohr wurden die verschiedenen Gase zugeführt und als kleine 1 bis 2 cm hohe Flamme bei F verbrannt. In etwa 30 cm Höhe über der Flamme konnte man dann gut die Eisteilchenmenge beobachten. Die äußeren Bedingungen, d. h. Temperatur und Feuchtigkeit wurden in dem Versuchsraum während einer Versuchsreihe möglichst konstant gehalten. Die gebildeten Fahnen waren bei den verschiedenen Verbrennungsstoffen ganz verschieden, aber zunächst anscheinend ohne Gesetzmäßigkeit, denn es stellte sich keine Abhängigkeit vom Wasserstoffgehalt der verbrannten Stoffe heraus, d. h. Abhängigkeit von der bei der Verbrennung der Stoffe gelieferten Wassermenge. Offenbar spielen die sonstigen in der Flamme entstehenden gasförmigen Verbrennungsprodukte neben den festen Verbrennungsprodukten, in erster Linie Kohlenstoffteilchen, eine bedeutende Rolle in dem Sinne, daß sie die entstehenden Keime für eine Sublimation zum Teil unbrauchbar machen.

Anhand dieser beschriebenen Beobachtungen und Überlegungen wurde versucht, die Bildung von Eisfahnen bewußt zu verhindern, indem man den Motorabgasen Stoffe zusetzte, bei denen die Wahrscheinlichkeit, daß sie sich auf die Sublimationskerne niederschlagen, verhältnismäßig groß ist. Die zu diesem Zwecke einzuschlagenden Wege waren verschieden. Einerseits wurde versucht, dem Motorenkraftstoff Zusätze beizumengen, die bei der Verbrennung im Motor Schwefelsäure, also  $\text{SO}_2$  bzw.  $\text{SO}_3$  oder Salzsäure er-

gaben. Bei der im Kolben und Auspuff erfolgenden gründlichen Durchmischung würden sich die von dem Verbrennungsvorgang im Motor gelieferten Kerne mit einer Haut von Schwefelsäure, bzw. Salzsäure überziehen. An einem kleinen Motor wurden zu diesem Zweck Versuche unternommen. Dem Kraftstoff wurden verschiedene Zusätze in verschiedener Stärke beige-mischt, die Verbrennungsgase aufgefangen und auf ihren Gehalt an Säuren untersucht.

Diese Art der „Kernvergiftung“ mußte aber, solange man von Schwefelsäure oder Salzsäure als Giftstoff ausging, zum Mißerfolg verurteilt sein, da diese Stoffe die hochgezuchteten Flugzeugmotoren in kürzester Zeit ruinieren müßten. Aus diesem Grunde wurde eine andere Art, die Kerne ebenso gründlich zu vergiften, erwogen. Im Auspuff der Motoren können die ätzenden Gase keinen so lebensbedrohenden Schaden für den Motor anrichten, wie in den Verbrennungsräumen selber. Da auch in den Auspufftöpfen eine für gute Durchmischung hinreichende Turbulenz herrscht, wurde versucht, in den Auspuffrohren den Motorabgasen Zusatzstoffe beizumischen.

Die Vorversuche hierzu wurden im Laboratorium ebenfalls mit der Schichtwolkenapparatur vorgenommen. Zur groben Orientierung, ob ein zugesetztes Gas überhaupt wirkt und welche ungefähren Mengen man benötigen würde, um die Eisteilchenbildung zu unterdrücken, wurde auch die Becherglasapparatur herangezogen. Das Volumen des Beobachtungsraumes war bekannt. Diesem wurden nach und nach kleine abgemessene Mengen Zusatzgas beige-mischt und so die ungefähr erforderlichen Mengen festgestellt. Hatte man ein Gas gefunden, das in geringer Menge schon wirksam die Eisteilchenbildung unterdrückte, so wurde in einer einfachen, die Verhältnisse im Auspuff nachahmenden Anordnung, die in Abb. 7 skizziert ist, geprüft, wie die Gase sich bei hohen Temperaturen in

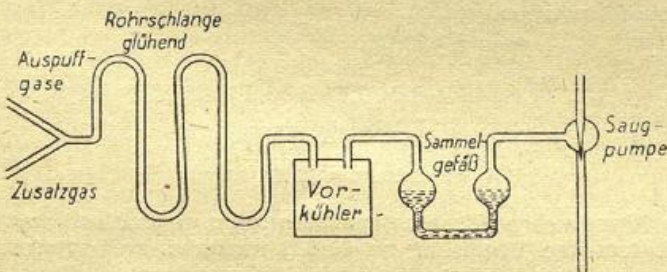


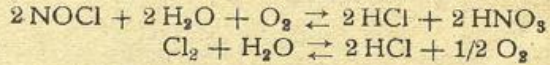
Abb. 7: Vorrichtung zur Prüfung von Auspuffgasen

Gegenwart von überhitztem Wasserdampf verhalten und umsetzen. Eine Analyse der Auspuffgase gab ein Bild von der Brauchbarkeit der verwendeten Gase.

In einem Rohrgabelstück wurden Auspuffgase und Zusatzgase gemischt, dann durch eine glühende Eisrohrspirale geleitet, worauf sie in einem Vorkühler einigermaßen abgekühlt wurden, bevor sie durch Wasser geleitet wurden. Die Geschwindigkeit des Gasstromes wurde durch Saugen mit einer Wasserstrahlpumpe reguliert. In dem Sammelgefäß wurden Salzsäure, bzw. Schwefelsäure gravimetrisch bestimmt. Da die den Auspuffgasen beige-mischten Gasmengen genau bekannt waren, konnte man sich durch quantitative Analyse der Gasprodukte nach Passieren der den Auspuff nachahmenden glühenden Rohrschlange ein ungefähres Bild von den zu erwartenden Schwefelsäure- bzw. Salzsäuremengen machen.

Man fand bei diesen Messungen eher zu große Mengen benötigten Zusatzgases, da ja meist noch andere Verbrennungsprodukte die Sublimation an den Kernen erschweren.

Schon bei diesen Vorversuchen wurde die Möglichkeit mit Schwefelsäurehäuten die Kerne zu vergiften ausgeschaltet, da es zunächst schwierig war, Schwefelsäure in genügender Menge in den Auspuffgasen herzustellen. Am bequemsten und den meisten Erfolg versprechend, waren Versuche mit Chlor, besser noch Nitrosylchlorid. Neben der Vergiftung der Kerne hatte man noch den Vorteil, daß diese Stoffe den Auspuffgasen Wasser entziehen, gemäß den Formeln:



Den Einfluß der Zusatzgase auf die Eisteilchenbildung konnte man mit der in Abb. 8 wiedergegebenen Anordnung in der Schichtwolkenapparatur unter Verhältnissen, die ungefähr den im Motorauspuff in der Atmosphäre gegebenen Umständen entsprechen, prüfen. Die ganze Anordnung hing in der abgekühlten Luftmasse im Schichtwolkenkessel. In dem Glaszylinder Z brennt eine kleine Flamme von Leuchtgas, Wasserstoff oder dergl. Der Brennstoffverbrauch konnte durch ein in der Brennstoffleitung eingebautes Differentialmanometer genau gemessen und reguliert werden. Durch eine zweite Leitung wurde in den oberen Teil der Flamme der den Auspuffgasen entsprechen würde, das entsprechende Gas geblasen. Die Gasmenge wurde durch ein Uhrwerk aus einem Glaszylinder mit eingeschliffenem Kolben langsam herausgepreßt. Diese Maßnahme war erforderlich, da es sich ergeben hatte, daß schon sehr kleine Gasmengen genügen, die Eisteilchenbildung zu unterbinden, so daß man durch Bewegen des Kolbens von Hand keinen genügend gleichmäßigen feinen Gasstrom abblasen kann.

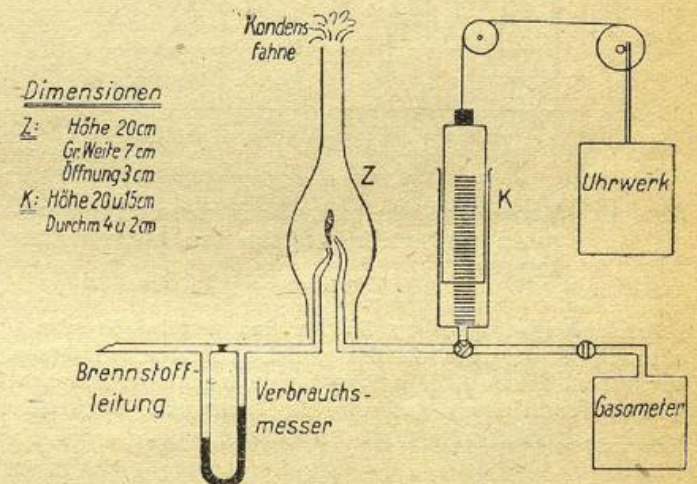


Abb. 8: Anordnung zur Prüfung des Einflusses von Zusatzgasen auf die Eisteilchenbildung

Durch einen Dreiwegehahn H konnte der Kolben aus dem Gasreservoir leicht nachgefüllt werden. Die in dieser Hinsicht angestellten zahlreichen Versuche sind zu keinem Abschluß gelangt, da sehr viel Gase miteinander kombiniert werden mußten und in jeder einzelnen Versuchsreihe die Abhängigkeit von der Konzentration, sowohl der Verbrennungsgase als auch der Zusatzgase gemessen werden mußte. Es wurde wie bei den anderen Versuchen mit Eisteilchen auch hier die Änderung der kritischen Temperatur der Eisteilchenbildung in Abhängigkeit von den Brennstoffen und den Zusatzgasmengen bestimmt. Es wurden zu jedem Stoff zwei verschiedene Meßreihen aufgenommen und zwar einmal bei konstanter Temperatur und zunehmenden Gasmengen, dann bei konstanter Zusatzgasmenge und fortschreitend absinkender Temperatur. Es ergaben sich sodann für einen Stoff z. B. die in den

folgenden Abbildungen schematisch wiedergegebenen Kurvenscharen mit der Temperatur und der Gasmenge als Parameter.

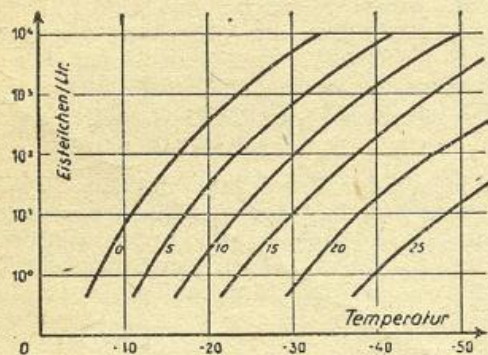


Abb. 9: Versuchsreihen mit konstanten Mengen Zusatzgas und stetig variabler Temperatur

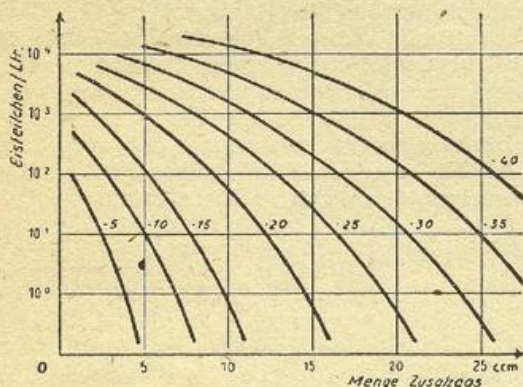


Abb. 10: Versuchsreihen mit konstanten Temperaturen und stetig gesteigerten Mengen Zusatzgas

Beide Messungsreihen hatten das gleiche Ergebnis, nämlich beide ergaben die gleichen kritischen Temperaturen, deren Abhängigkeit von der Menge Zusatzgas wieder in einem gesonderten Diagramm dargestellt wurde, wie es die folgende Abbildung zeigt.

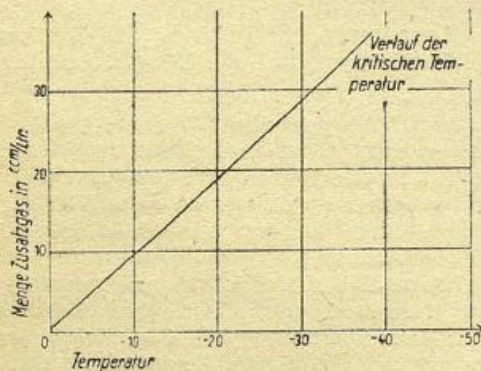


Abb. 11: Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Eisteilchenbildung von der Zusatzgasmenge

Qualitativ haben diese Versuche ergeben, daß Halogen als Zusatzgas die Eisteilchenbildung zumindestens sehr stark beeinträchtigt, wenn nicht gar ganz unmög-

lich macht. Die optimalen Zusatzmengen von Halogen zum Auspuffgas konnten noch nicht genau ermittelt werden, d. s. diejenigen Mengen, bei denen man mit einem Minimum an Halogen ein Maximum an Wirkung auf die Eisteilchen erzielt. Die Wirkung des Gases nimmt mit steigender Menge ab und ist bei den einzelnen Kraftstoffen sehr verschieden, was ja durchaus erklärlich ist, da sich alle durch einen verschiedenen Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt voneinander unterscheiden.

Für die praktische Anwendung von Chlor als Zusatzgas war ein einfaches Rohrsystem vorgesehen, das zu den Auspuffen der Motoren führte. In jedem Auspufftopf war eine Rohrendung eingeschweißt, so daß alle vom Motor abgestoßenen Gase bei hoher Temperatur mit Chlor durchmischt werden konnten. Die Anlage war in mehreren Flugzeugmustern (He 111, Ju 88, Ju 388) eingebaut. Zur Durchführung praktischer Versuche mit Bodenbeobachtung ist es aber auch hier kaum gekommen, da zu viel technische Nebenbedingungen für diese Flüge erfüllt sein mußten, die aber in den Jahren 1944/45 durchaus nicht mehr gegeben waren. Vor allem bereitete die Wetterlage, die Kondensfahnen bei guter Möglichkeit der Bodenbeobachtung liefern mußte, Schwierigkeiten. Hinzu kam, daß auf diesem Gebiet eine Menge technischer Erfahrungen gesammelt werden mußte, wie z. B. Dosierung der abgegebenen Gase, genaue Messung des Gasstromes, Herstellung ferngesteuerter Ventile usw. Außerdem mußten die zur Verfügung stehenden Flugzeuge eine hinreichende Gipfelhöhe erreichen können, um in das Kondensfahneniveau vorzudringen. Nach mündlichen Angaben von Findeisen — der Bodenbeobachter war in der Sicht behindert — sei es gelungen, eine gebildete Kondensfahne für einige Zeit zu unterbrechen. Das Ziel, „gemorste Kondensfahne“, d. h. die Kondensfahne durch Chlorzusatz willkürlich zu unterbrechen, so daß sie als Morseschrift am Himmel erscheint, ist mit den sehr wenigen Erprobungsflügen noch nicht erreicht worden.

## II. Versuche zum Problem der Vereisung.

(Versuche von H. W. Maaß)

Der in ihren Ursachen und Erscheinungen hinreichend bekannten Vereisung an Luftfahrzeugen zu begegnen, ist auf zwei Wegen möglich. Einmal durch technische Enteisungsanlagen, andererseits durch eine zweckentsprechende meteorologisch geleitete Navigation. Da der technische Aufwand zu einer wirksamen Enteisung der Luftfahrzeuge sehr groß und kostspielig ist, wurde von der Wolkenforschungsstelle stets der zweite Weg als der rationellere und zugleich wirksamere vorgeschlagen und vertreten. Die meteorologische Navigation durch geeignete instrumentelle Hilfsmittel zu erleichtern, war das Ziel der im folgenden beschriebenen Versuche.

Aus einer großen Zahl von Erkundungsflügen bei schwersten Vereisungslagen, bei denen oft über 150 mm Eisansatz an den Flugzeugteilen erflogen wurden, ermittelte man diejenigen Stellen am Flugzeug, an denen mit Aussicht auf Erfolg ein Gerät angebracht werden konnte, welches die Tendenz der Vereisung bei den verschiedensten Vereisungslagen zu beobachten gestattete.

In der Arbeit über Gewitterelektrizität<sup>1)</sup> und Eissplitterbildung<sup>2)</sup> war schon beschrieben worden, wie durch Ansatz von Eis elektrische Ladungen entstehen.

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 57, 201 (1940).

<sup>2)</sup> W. u. E. Findeisen, Meteor. Z. 60, 145 (1943).

Entsprechend muß sich ein Luftfahrzeug, das im Fluge Eis ansetzt, elektrisch aufladen. Wenn man also die Aufladung des Flugzeuges oder eines isoliert angebrachten Probekörpers messend verfolgen kann, muß man zu einer Vereisung anzeigenden Gerät gelangen können. Von dieser Überlegung aus wurde zunächst die Entwicklung eines Vereisungswarngerätes für Luftfahrzeuge, das nicht die vollendete Tatsache der Vereisung, sondern schon die Tendenz und den ersten Beginn sowie spätere Abnahme des Eisansatzes anzeigt, in Angriff genommen. Aber schon bei den Vorversuchen stellten sich instrumentelle Schwierigkeiten im Flugzeug heraus, die die Entwicklung eines für den praktischen Gebrauch geeigneten Gerätes aussichtslos machte, außerdem zeigten sich zahlreiche Nebeneffekte, so daß man kaum über die Messung der verschiedenen Potentialgefälle bei Wolkenflügen hinausgekommen ist.

Auch diese Messungen können nur als Vorversuche, nicht als Ergebnis gewertet werden, da sie in keiner Weise reproduzierbar waren. Eine Zusammenstellung der bei diesen Flügen gesammelten Erfahrungen, soweit sie als einigermaßen gesichert angesehen wurden, ist veröffentlicht worden.<sup>1)</sup>

Da mit Schwierigkeiten, die bei elektrostatischen Messungen in Flugzeugen auftreten konnten, von Anfang an gerechnet wurde, versuchte man gleichzeitig von einer anderen Seite an das Problem heranzukommen. Wenn an einer Stelle des Flugzeuges Eisansatz auftritt, so muß sie gegenüber einer Stelle, die keinen Eisansatz hat und normalerweise die gleiche Temperatur wie die erste Stelle hat, eine andere Temperatur bekommen. Wenn man also zwei Thermometer am Flugzeug so anbringt, daß beide dem gleichen Luftstrom ausgesetzt sind, wobei an dem einen eine Vereisung auftritt, das andere aber gegen Eisansatz geschützt ist, so muß man aus der sich ergebenden Temperaturdifferenz auf Eisansatz oder Abschmelzen des Eises Rückschlüsse ziehen können. Versuche in dieser Richtung hatten Erfolg und es wurde in den Jahren 1941/43 systematisch an der Entwicklung eines Vereisungswarngerätes auf thermometrischer Grundlage gearbeitet und zum Abschluß gebracht. Richtiger muß das Gerät als Vereisungsvariometer bezeichnet werden, da es die zeitliche Änderung des Eisansatzes am Flugzeug in mm Eisansatz/min anzeigt, ohne allerdings dabei einen Anspruch auf absolute Genauigkeit zu erheben. Es sollte nur die jeweils herrschende Tendenz der Vereisung bzw. Enteisung größenordnungsmäßig angezeigt werden. Diesen Zweck hat das entwickelte Gerät, das im Jahre 1944 serienweise gebaut und geliefert wurde, erfüllt.

Als Thermometer kamen für diese Messungen nur elektrische Widerstandsthermometer in Frage, da man mit ihnen die Temperatur-Differenz unmittelbar messen kann. Dünne Platindrähte als Widerstandskörper erwiesen sich als ungeeignet, da sie zu leicht, besonders bei dem beaufschlagten Thermometer, durch in der Luft wirbelnde Teilchen, wie Insekten, Staub oder Hagel bei der hohen Fluggeschwindigkeit zerschlagen wurden. Schließlich fand sich in dem von der AEG in Berlin hergestellten Widerstandsmaterial „Urdox“, einem künstlichen Mineral vom Spinell-Typ (Ti-Mg-Spinell), ein geeigneter Stoff, der den geforderten Bedingungen einigermaßen entsprach, nämlich:

1. mechanisch genügend widerstandsfähig zu sein,
2. einen möglichst großen Temperaturkoeffizienten aufzuweisen,
3. einen zeitlich hinreichend konstanten Widerstand zu haben.

Die Widerstände wurden in Form von Kreisringen aus Urdoxmaterial mit einem äußeren Durchmesser von

etwa 2 cm und einer Ringbreite von 7—8 mm bei einer Stärke von etwa 2 mm hergestellt. Für den elektrischen Anschluß waren auf jeder Seite des Urdoxringes mit Metall je ein Kupferdraht aufgespritzt. Das Urdoxmaterial hat eine exponentielle, negative Widerstandscharakteristik. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur wird durch die empirisch aufgestellte Formel

$$R = a \cdot e^{-\frac{b}{T}}$$

recht gut erfaßt. Darin bedeuten:

R = Ohmscher Widerstand der Scheiben, bei 0° C, 100 bis 300 Ω

a = Materialkonstante in der Größenordnung 0,1–0,3

e = Basis der natürlichen Logarithmen

b = Temperaturkoeffizient, von Form und Material abhängig, meist in der Größenordnung 2000° K.

T = Absolute Temperatur in °K

Die folgende Tabelle gibt ein Bild der Widerstände von Urdoxscheiben und dem Einfluß der Materialkonstanten.

T	1/T	Tabelle			
		a = 0,2739	a = 0,1500	a = 0,2739	a = 0,15
		b = 1800	b = 1800	b = 2000	b = 2000
		R	R	R	R
223	0,004484	877,2	480,0	2150,5	1178,0
233	0,004291	620,0	339,7	1463,5	801,5
243	0,004115	451,0	247,2	1028,8	563,0
253	0,003953	336,7	184,4	742,5	401,7
263	0,003802	256,0	140,7	549,5	301,0
273	0,003662	200,0	109,5	416,0	227,9
283	0,003533	158,4	86,8	321,0	175,8
293	0,003413	127,5	69,4	252,3	138,2
303	0,003301	104,1	57,0	201,4	110,3
313	0,003195	86,1	47,1	163,1	89,4

In den beiden Abbildungen 12 und 13 sind die Werte der obigen Tabelle dargestellt und zeigen die Widerstandscharakteristik des Urdoxmaterials in linearem und einfachlogarithmischem Maßstab.

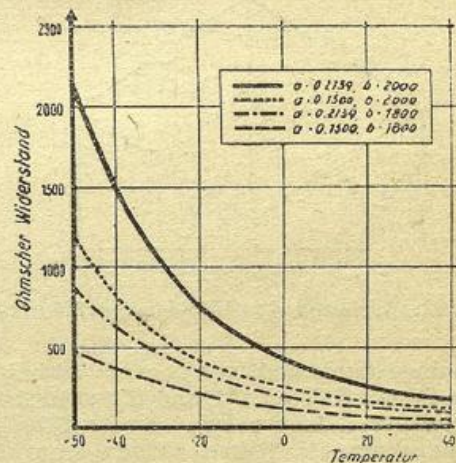


Abb. 12: Abhängigkeit des Widerstandes von Urdox-Scheiben bei verschiedenen Materialkonstanten a und b

Durch die Koeffizienten a und b ist eine jede Urdox-scheibe genau charakterisiert, so daß man aus ihnen ersehen kann, ob ein Scheibenpaar für ein Vereisungsvariometer geeignet ist. Zur Bestimmung der Konstanten wurde stets eine größere Anzahl von Widerstandsscheiben im Temperaturbad (Methylalkohol oder Toluol) geeicht. Dazu genügte die Aufnahme von 2,

<sup>1)</sup> W. Findelsen, Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD Reihe A 25, 1944.

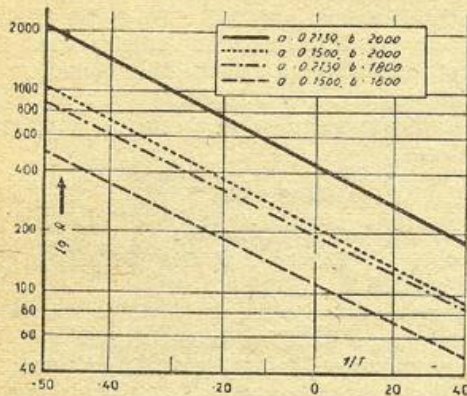


Abb. 13: Abhängigkeit des Widerstandes von Urdox-Scheiben bei verschiedenen Materialkonstanten a und b Widerstand logarithmisch aufgetragen

höchstens 3 Eichpunkten. Die Konstanten wurden so dann graphisch aus der logarithmischen Darstellung entnommen, da ja b in der Steigung der Kurven und a mit dem Ordinatenabschnitt gegeben ist, sofern man als Abzisse  $1/T$  aufträgt. Für ein Vereisungsvariometer konnten natürlich immer nur Scheibenpaare mit gleicher oder nahezu gleicher Charakteristik verwendet werden. Bei einer größeren Menge Scheiben fanden sich im allgemeinen genügend passende Paare, so daß man keinen großen Ausschuß hatte. Die Schaltung der Scheiben erfolgte im Vereisungsvariometer in der bekannten Brückenschaltung mit dem 28-Volt-Bordnetz als Spannungsquelle. Die beiden Brückenwiderstände  $R_1$  und  $R_2$  (Abb. 14) waren in der Größe den Widerständen der Urdoxscheiben angepaßt, hatten also meist einen Widerstand zwischen 100 und 300 Ohm, während die Vorschaltwiderstände  $R_3$  zur Regulierung der Brückenströme 2000—3000 Ohm hatten.

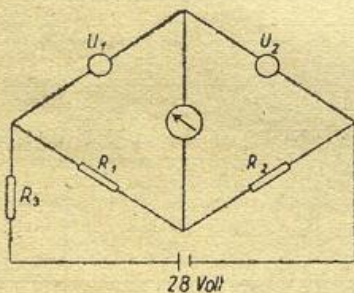


Abb. 14: Schaltschema des Vereisungsvariometers

Eine Temperaturniedrigung oder -Erhöhung an den beiden Urdoxscheiben  $U_1$  und  $U_2$  stört das Brückengleichgewicht nicht, sofern beide Scheiben die gleiche Charakteristik haben. Wenn nun aber die Scheibe  $U_1$  der Vereisung ausgesetzt ist, ändert sich ihre Temperatur und damit ihr Widerstand — das Gleichgewicht an der Brücke ist gestört und das Brückengalvanometer zeigt einen Ausschlag an, den man in mm Eisansatz/min ungefähr eichen kann. Beim Abschmelzen des Eises erfolgt der umgekehrte Gang der Temperatur und damit der Widerstandsänderung, das Galvanometer schlägt in die entgegengesetzte Richtung wie bei der Vereisung aus und zeigt also Enteisung an.

Die praktische Anwendung der Scheiben hat eine Reihe von Flugversuchen benötigt, bis man ein zufried-

denstellendes Arbeiten des Anzeigerätes erreicht hatte, denn dafür war erforderlich:

1. eine Stelle am Flugzeugkörper, an der frühzeitig sich einwandfrei die Tendenz zu einem Eisansatz bemerkbar macht;
2. Schutz des Instrumentes vor Strahlung und sonstigen thermischen Einflüssen;
3. günstige aerodynamische Form des Instrumentes;
4. beide Thermometerkörper müssen dem gleichen, möglichst ungestörten Luftstrom ausgesetzt sein, wobei das eine beaufschlagt werden soll, das andere aber vor der Beaufschlagung geschützt sein muß.

Die in Abb. 15 skizzierte Anordnung hat sich zum Schluß bewährt und wurde im Serienbau hergestellt.

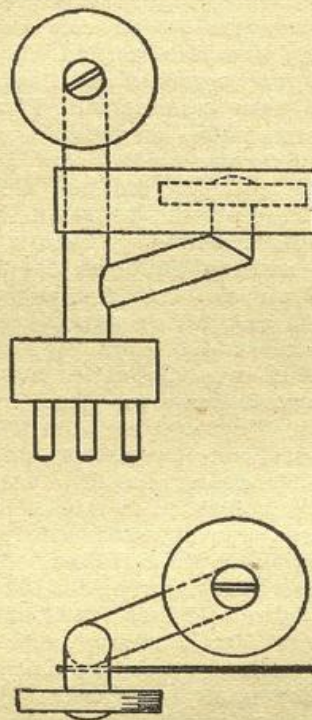


Abb. 15: Anordnung der Urdox-Scheiben beim Vereisungsvariometer „Käfer“ von der Seite und von oben.

Die beiden Urdoxscheiben waren auf einer Rohrgabelung auf Isolierungsunterlagen mit Schrauben in der Weise befestigt, daß die eine Scheibe mit ihrer größten Fläche senkrecht zum Luftstrom zu stehen kam und von allen vorbeistreichenden Luftteilchen getroffen wurde, während die zweite Urdoxscheibe hinter einer kleinen Abschirmplatte so angebracht war, daß ihre größte Fläche parallel zum Luftstrom stand, also die Scheibe die Temperatur der vorbeistreichenden Luft wohl annahm, nicht aber von Wasserteilchen unmittelbar getroffen wurde.

Die Rohrhalterung wurde gleichzeitig zur Aufnahme der elektrischen Zuleitungen benutzt. Der Steckersockel diente zugleich zur Aufnahme der Widerstandsspulen. Die ganze Anordnung umgab ein Schutzblech, das gegen äußere mechanische Einflüsse und Strahlung abschirmte, aber doch die Luft ungehindert an die Meß-Scheiben gelangen ließ. Dieses Gerät wurde an einer Stelle der Flugzeughaut — die möglichst tangential angeströmt wurde — angebracht, so daß es von einem ungestörten Luftstrom getroffen wurde und störende Einflüsse vom Motor oder von der Luftschraube ausgeschlossen waren. Das Brückengalvanometer war am Armaturenbrett der Flugzeuge leicht zu befestigen.

Das Instrument zeigt Vereisung und Enteisung im allgemeinen richtig an. In einzelnen Fällen können Fehlanzeigen zustande kommen, die aber ohne weiteres als solche zu erkennen sind. Eine Fehlanzeige muß z. B. dann auftreten, wenn in einem wolkenlosen Raum durch Schräglage der Flugzeuge die eine Urdoxscheibe direkter Erwärmung durch Sonnenstrahlung ausgesetzt ist. In diesem Falle würde das Instrument Vereisung anzeigen.

Die Empfindlichkeit des Instrumentes konnte durch eine Lackschicht, die auf den Urdoxscheiben angebracht war und den Wärmeausgleich verlangsamte, reguliert und einmalig auf eine gewünschte Stufe eingestellt werden.

Das Vereisungswarngerät ist in zwei Typen entwickelt worden. Die erste — Deckname Käfer — wurde auf der Flugzeughaut angebracht und bedeutete besonders für schnelle Flugzeuge eine unerwünschte Erhöhung des aerodynamischen Widerstandes. Dieser Nachteil sollte in einer zweiten Type — Deckname Made — dadurch beseitigt werden, daß das Gerät in die Tragfläche hineingebaut wurde. Eine besondere Rohrleitung führte den Urdoxscheiben den ungestörten Luftstrom zu.

Andere, mit der Vereisung verbundene Probleme wurden gelegentlich in kleineren Versuchen bearbeitet und demonstriert. So sind Versuche zum experimentellen Beweis der Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit durchgeführt worden, die in einer einfachen Meßanordnung die Abhängigkeit eindrucksvoll zu demonstrieren und zu messen gestattet<sup>1)</sup>. Siehe Neudruck dieser Veröffentlichung im Anhang.

### III. Elektrische Messungen an Wolken.

Die Messungen zur Bestimmung der Aufladung von Flugzeugen und der Potential-Differenzen in Wolken sind in dem Abschnitt II in ihren Ergebnissen und Veröffentlichungen erwähnt worden. Außer den dort beschriebenen wurden keine weiteren Versuche angestellt.

### IV. Temperaturmessungen vom Flugzeug aus.

(Versuche von W. Findeisen, B. Walliser und H. W. Maaß.)

Die Bestimmung der wahren Temperatur vom Flugzeug aus wird mit steigenden Fluggeschwindigkeiten zu einem immer größeren Problem, da die durch Stau und Luftreibung hervorgerufene Erwärmung der Thermometerkörper nicht mehr zu vernachlässigende und schwer genau zu korrigierende Temperaturerhöhungen bewirkt.

Die für einen tangential angeströmten Thermometerkörper berechnete Temperaturerhöhung durch Reibung in der Grenzschicht ist von Pohlhausen<sup>2)</sup> durchgeführt worden zu

$$\Delta T = \frac{1}{8} \cdot \frac{A \cdot v^2}{c_p} \beta(\sigma) \quad (1)$$

darin bedeuten A = mechanisches Wärmeäquivalent in cal/erg = 0,238 · 10<sup>-7</sup> cal/erg.

c<sub>p</sub> = spez. Wärme der Luft bei konstantem Druck = 0,240 cal/g · grad

β(σ) = Faktor, für Luft = 3,58

v = Strömungsgeschwindigkeit am Thermometer in cm/sec.

Wenn man die Geschwindigkeit v nicht in cm/sec mißt, sondern als u in 1/100 km/h, geht die Formel über in

$$\Delta T = 0,343 \cdot u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

$$\Delta T = c_1 \cdot u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2a)$$

Praktisch wird diese Temperaturerhöhung nicht erreicht, da die Thermometerkörper nie ideal windschnittig sind, sondern in mehr oder weniger großem Maß an ihnen eine Ablösung der Grenzschicht erfolgt, so daß nur ein Bruchteil von obigem ΔT erreicht wird, der durch die Form der Thermometerkörper bedingt wird. Diese, von der äußeren Thermometerform abhängige Differenz stellt also eine Gerätekonstante 0 < k<sub>1</sub> < 1 dar. Um die wahre Temperaturerhöhung durch Reibung zu erhalten, muß man den theoretisch berechneten Wert mit dieser Konstanten multiplizieren. Es ist also

$$\Delta T = k_1 \cdot c_1 \cdot u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} = k_1 \cdot 0,343 u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

Neben der Reibungserwärmung tritt als zweite Ursache die Erwärmung durch die Kompression der am Thermometerkörper gestauten Luft auf. Die Berechnung der dadurch hervorgerufenen Temperaturdifferenz hat W. Findeisen<sup>1)</sup> durchgeführt. Man kann diese Erhöhung auch auf einfacherem Wege errechnen als in der angeführten Arbeit, indem man von der allgemeinen Gasgleichung ausgeht.

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (4)$$

Wenn man hierin die Luftdichte ρ einsetzt, geht die Formel über in

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T \quad (5)$$

Die Kompression beim Stau kann man als adiabatische Kompression auffassen, die nach dem Poisson'schen Gesetz erfolgt.

$$p \cdot v^\kappa = K, \text{ wobei } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \text{ ist} \quad (6)$$

Wenn man aus (4) und (6) v eliminiert, ergibt sich

$$p^\kappa \cdot K \cdot p^{-1} = R^\kappa \cdot T^\kappa \quad (7)$$

oder, wenn man die Konstanten zusammenfaßt zu k' =  $\frac{R^\kappa}{K}$ .

$$p^{\kappa-1} = k' \cdot T^\kappa$$

$$p = k'' \cdot T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (8)$$

Wenn man diesen Ausdruck logarithmisch differenziert, erhält man

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{\Delta T}{T} \text{ oder } \Delta T = \frac{\kappa-1}{\kappa} \frac{T}{p} \cdot \Delta p \quad (9)$$

Nach der Bernoullischen Gleichung ist  $\Delta p = \frac{\rho}{2} u^2$  und (9) geht sodann über in

$$\Delta T = \frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2$$

Nach (5) ist  $\frac{T \cdot \rho}{p} = \frac{1}{R}$  also ist  $\Delta T = \frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot \frac{1}{2R} u^2$

Wenn man die Konstanten zusammenfaßt zu

$$c_2 = \frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot \frac{1}{2R} \text{ erhält man } \Delta T = c_2 u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10)$$

Für Luft hat c<sub>2</sub> die Größe

$$c_2 = \frac{0,40}{1,40 \cdot 2 \cdot 287 \cdot 3,6^2} = 3,83 \cdot 10^{-5}$$

Wenn u wiederum in 1/100 km/h gemessen ist, errechnet sich die Temperaturerhöhung durch Kompression nach der Formel

$$\Delta T = 0,383 u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} = c_2 u^2 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11)$$

<sup>1)</sup> W. Findeisen und B. Walliser, Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD Reihe A 20 (1943).

<sup>2)</sup> E. Pohlhausen Z. f. angew. Math. u. Mech. 1, 121 (1921).

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Ann. d. Hydr. 65, 571 (1936).

Diese Formel gilt bei vollkommener Umwandlung der kinetischen Energie der Strömung durch Stau in Wärme, was aber praktisch kaum eintritt, so daß auch hier eine Gerätekonstante  $0 < k_2 < 1$  eingeht zu

$$\Delta T = k_2 c_2 u^2 [^\circ\text{C}] = 0,383 k_2 u^2 [^\circ\text{C}] \quad (12)$$

$$\Delta T = k \cdot \frac{1}{3} u^2 [^\circ\text{C}] \quad (12a)$$

An den Thermometerkörpern ist nur an den Stellen mit der Strömung 0, also reinem Stau, die Gleichung (11) und an den Stellen mit rein tangentialer Anströmung Gleichung (2) erfüllt. An den übrigen Stellen werden Reibung und Stau in einem von Ort zu Ort verschiedenen Verhältnis zur Erwärmung beitragen. Da sowohl  $c_1$  und  $c_2$  als auch  $k_1$  und  $k_2$  einander größtmäßig entsprechen, kann man im wolkenfreien Raum

$$\Delta T = k \cdot \frac{1}{3} u^2 [^\circ\text{C}] \quad (13)$$

setzen. Die Gerätekonstante  $k$ , die also die Konstanten  $k_1$  und  $k_2$  enthält, kann für die einzelnen Thermometerkörper nur experimentell bestimmt werden.

Für rein tangential angeströmte Platten oder Zylinder, wie man sie an Meteorographen- oder Bordthermometern findet, hat  $k$  den Wert 0,85. Kugelförmige Thermometerkörper haben ein  $k$  von etwa 0,7.

Von diesen Überlegungen ausgehend wurde versucht, durch Messungen mit elektrischen Thermometern im Lee von Vorsatzkörpern Bestimmungen des  $k$  durchzuführen. Diesen Vorsatzkörpern wurden verschiedene windschnittige Formen gegeben, wie sie in der Abbildung 16 wiedergegeben sind.

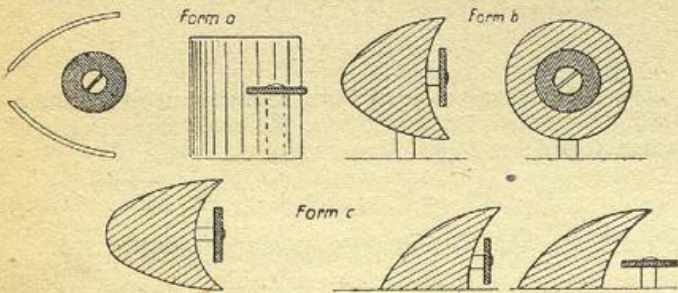


Abb. 16: Vorsatzkörper für Messungen mit elektrischen Thermometern

Durch die Bestimmung der  $k$ -Werte dieser verschiedenen Formen sollte versucht werden, zu einer Form mit einem möglichst kleinen  $k$ -Wert zu kommen. Als Temperaturgeber wurden bei diesen Versuchen in erster Linie Urdoxscheiben benutzt, da am Ende der Versuche ein mechanisch stabiles, für den praktischen Gebrauch geeignetes Bordthermometer entstehen sollte. Die gefundenen Werte für  $k$  schwankten um 0,68. Es ergaben sich aber bei dieser Art der Bestimmung der  $k$ -Faktoren erhebliche Schwierigkeiten. Da man  $T$  ja nie bei der Geschwindigkeit  $u = 0$  messen kann, ist man nur auf Messungen des  $\Delta T$  für verschiedene Geschwindigkeiten angewiesen. Angenommen, die wahre Temperatur der Luft sei  $T_0$ . Dann mißt man bei der Geschwindigkeit  $u_1$  die scheinbare Temperatur  $T_1$

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{3} k u_1^2 \quad (14)$$

Bei der Geschwindigkeit  $u$  wird die scheinbare Temperatur  $T_2$  gemessen als

$$T_2 = T_0 + \frac{1}{3} k u_2^2 \quad (14a)$$

Die gemessenen Temperaturdifferenzen bei verschiedenen Geschwindigkeiten gestatten dann, das  $k$  zu berechnen.

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{1}{3} k (u_1^2 - u_2^2) \quad \Delta u \text{ oder}$$

$$k = \frac{3}{u_1^2 - u_2^2} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta u} \quad (15)$$

Mit dem Flugzeug war die Bestimmung des  $k$  mit exakter Genauigkeit trotz vieler Versuche und Verbesserungen instrumenteller Art nicht möglich. Denn in der Luft treten infolge ihrer Temperaturschwadigkeit auf den zu den Messungen benötigten Strecken oft Temperaturschwankungen auf, die an die Größe der gemessenen  $\Delta T$  heranreichen. Auch zeigte sich, daß die Luftschicht in der Nähe der Flugzeughaut erheblich gestört ist, nicht allein hinsichtlich der wahren Temperatur, sondern auch hinsichtlich des Staues, so daß man schwer reproduzierbare Werte erhielt. Daraufhin wurden die gleichen Messungen im Windkanal mit den gleichen Geschwindigkeiten wiederholt. Diese Messungen ergaben ungefähr die gleichen Werte, wie die Messungen im Flugzeug.

Wie schon von Findeisen angegeben wurde<sup>1)</sup>, sind die Temperaturerhöhungen beim Wolkenflug durch die Verdunstung des die Thermometerkörper benetzenden Wassers entsprechend niedriger. Es ist

$$\Delta T = \frac{1}{3} k u^2 \cdot f(T,p) \text{ wobei } f(T,p) < 1 \text{ ist.} \quad (16)$$

Und zwar ist  $f(T,p)$  von der Dichte der Wolken abhängig und es kann größenordnungsmäßig  $f(T,p) = 0,5$  angenommen werden.

Nachdem sich herausgestellt hatte, daß man bei den bis dahin gebräuchlichen Temperaturmeßmethoden mit entsprechenden Korrekturen zu keinem befriedigenden Ergebnis kommen konnte, wurde versucht, andere Wege zu beschreiten. Das Ziel war, zu einem Temperaturmeßgerät zu gelangen, das

1. ohne Korrektur die wahre Lufttemperatur anzeigt,
2. von der Feuchte unabhängige Werte liefert, also in und außerhalb von Wolken gleich zuverlässige Meßwerte gibt,
3. von der Luftdichte unabhängig ist.

Dem Versuch zur Entwicklung eines solchen Gerätes lagen folgende Überlegungen zugrunde:

Eine Luftströmung mit der Geschwindigkeit  $u_1$  strömt durch eine ringförmige Düse mit dem in Abb. 17 gezeichneten Längsschnitt.

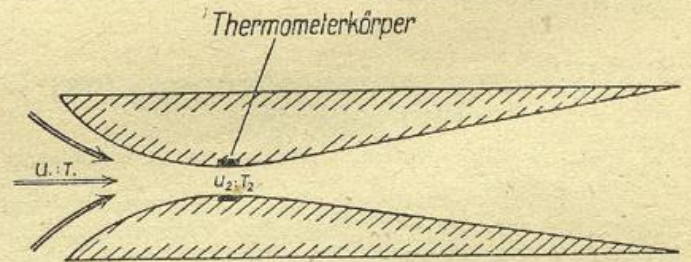


Abb. 17: Schema eines „Kompensationsthermometers“

Die Geschwindigkeit  $u_1$  des Luftstromes mit der wahren Temperatur  $T_0$  nimmt in der Düse zu und habe an ihrer engsten Stelle die Geschwindigkeit  $u_2$ . Das Verhältnis der Geschwindigkeiten  $\frac{u_2}{u_1}$  bezeichnen wir als den Verstärkungsfaktor der Düse und setzen

$$\frac{u_2}{u_1} = n^2 = h \quad (17)$$

wobei  $h$  das Druckverhältnis der Manometeranzeigen ist.

An der engsten Stelle der Düse herrscht ein Unterdruck gegenüber dem Druck außerhalb der Düse, den man nach der Bernoullischen Gleichung berechnen kann zu

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (u_2^2 - u_1^2) \quad (18)$$

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Ann. d. Hydr. 66, 571 (1938).  
Forsch. u. Erf. Ber. d. RWD, Reihe A, 11 (1941).

Die Luft wird an der engsten Stelle der Düse also adiabatisch ausgedehnt. Infolge dieser adiabatischen Dilatation sinkt die Temperatur des Luftstromes von  $T_0$  auf  $T_1$ , wobei nach (11)

$$T_0 - T_1 = c \cdot (u_2^2 - u_1^2) \quad (19)$$

Ein an der engsten Stelle der Düse angebrachter ringförmiger Thermometerkörper würde also tangential mit der Geschwindigkeit  $u_2$  angeströmt. Die durch die adiabatische Dilatation erniedrigte Lufttemperatur  $T_1$  würde durch Reibung auf den Wert  $T_2$  ansteigen:

$$\text{Nach (12) ergibt sich der Erwärmungsbetrag zu} \\ T_2 - T_1 = k \cdot c \cdot u_2^2 \quad (20)$$

Wenn man nun an die Dimensionierung der Düse die Bedingung stellt, daß die Erwärmung durch Reibung durch die adiabatische Dilatation kompensiert wird, kann man daraus die Werte für ein Kompensationsthermometer ableiten, das den oben gestellten Forderungen genügt.

Wir stellen also die Bedingung  $T_2 = T_0$ . Aus (19) und (20) erhält man dann

$$k \cdot c \cdot u_2^2 = c (u_2^2 - u_1^2) \\ u_2^2 - u_1^2 = k u_2^2 \\ k = \frac{u_2^2 - u_1^2}{u_2^2} = 1 - \frac{1}{n^2} \text{ oder } n^2 = \frac{1}{1 - k} \quad (21)$$

Da nun nach genauen experimentellen Messungen für einen tangential angeströmten Thermometerkörper — wie er an dieser Stelle in Frage käme —

$$k = 0,85 \text{ ist,}$$

ergibt sich nach (21) für die Düse ein Verstärkungsfaktor

$$n = \sqrt{\frac{1}{1 - 0,85}} = 2,58$$

Eine Düse der in Abb. 13 angegebenen Form müßte also so dimensioniert sein, daß die Geschwindigkeit  $u$  eines Luftstromes an ihrer engsten Stelle auf  $u_2 = 2,58 \cdot u_1$  ansteigt. Ein an dieser Stelle angebrachtes tangential angeströmtes zylindrisches Widerstandsthermometer würde dann die wahre Lufttemperatur angeben, unabhängig von der Luftdichte und der Luftfeuchtigkeit.

Die Bedingung  $u_2 = 2,58 u_1$  ist schwer zu erreichen. Wie aber weiter unten gezeigt wird, ist es für die meisten praktischen Zwecke auch gar nicht erforderlich, diesen Wert zu erreichen, sondern es genügt ein  $n \sim 1,7 - 1,8$  für die meisten Zwecke vollauf. Der Steigerung des Übersetzungsverhältnisses stehen neben den Einflüssen des Materials (Oberfläche) und Düsenform auch noch aerodynamische Schwierigkeiten entgegen. Die Beziehung

$$n = \frac{u_2}{u_1} = \frac{F_1^2}{F_2^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

( $F_1 =$  Querschnitt,  $d_1 =$  Durchmesser der Düsenöffnungen)

gilt wegen der Krümmung der Stromlinien nur für kleine Verstärkungen, denn sonst hätte man z. B. den höchst erreichten Wert für  $n = 1,6$  bei einem Durchmesser Verhältnis  $\frac{d_1}{d_2} = 1,26$  finden müssen. Tatsächlich

aber lag das Durchmesser Verhältnis bei dieser Düse bei etwa 5,0. Bei einer Fortführung der Versuche wäre man wohl noch zu etwas höheren Werten von  $n$  gekommen, jedoch mußten die Versuche vor ihrem Abschluß infolge der Kriegsverhältnisse abgebrochen werden.

Für Geschwindigkeiten über 450 km/h treten Komplikationen auf, die nicht so ohne weiteres zu erfassen sind, da man dann mit  $u_2$  in die Größe der Schallgeschwindigkeit gelangt, wo die normalen Strömungs-

gesetze nicht mehr gelten. Hinzu kommt, daß für große Geschwindigkeiten  $u$  der Verstärkungsfaktor  $n$  bei der gleichen Düse nicht mehr konstant, sondern eine Funktion der Geschwindigkeit ist. Jedoch dürften sich auch hier für das angegebene Kompensationsthermometer Wege finden lassen, die auch bei größeren Geschwindigkeiten zu hinreichend genauen und brauchbaren Werten führen.

Wenn man mit diesen Thermometern auch zunächst noch nicht die volle Kompensation erzielte, sondern ebenfalls nur einen Bruchteil, so daß man sie auch noch wieder mit einem Instrumentenfaktor  $k$  versehen mußte, so bilden sie doch einen Schritt in der gewünschten Richtung. Der  $k$ -Faktor eines solchen nicht vollständig kompensierten Thermometers berechnet sich folgendermaßen:

$$T_2 - T_0 = \Delta T = K \cdot c \cdot u_2^2 \quad (22)$$

Aus (19) und (20) folgt andererseits wobei  $T_2 > T_1$  ist.

$$\Delta T = k \cdot c \cdot u_2^2 - c \cdot (u_2^2 - u_1^2) \quad (23)$$

Durch Gleichsetzung (22) = (23) erhält man

$$K c u_2^2 = k c u_2^2 - c (u_2^2 - u_1^2)$$

$$K = \frac{(k-1) u_2^2 + u_1^2}{u_2^2}$$

$$K = (k-1) + \frac{1}{n^2} \quad (24)$$

Für ein tangential angeströmtes Thermometer mit dem Faktor  $k = 0,85$  ergibt sich dann bei einem Verstärkungsfaktor  $n = 1,6$

$$K = -0,15 + \frac{1}{1,6^2} = 0,24$$

Das bedeutet folgende anzubringende Korrekturen

$u_1$ in km/h	100	200	300	400
$\Delta T$	0,07	0,3	0,7	1,3
$\Delta \delta$	0,25	1,1	2,5	4,5

Einen Überblick über die Ergebnisse zeigt die folgende graphische Darstellung der Gleichung (24)

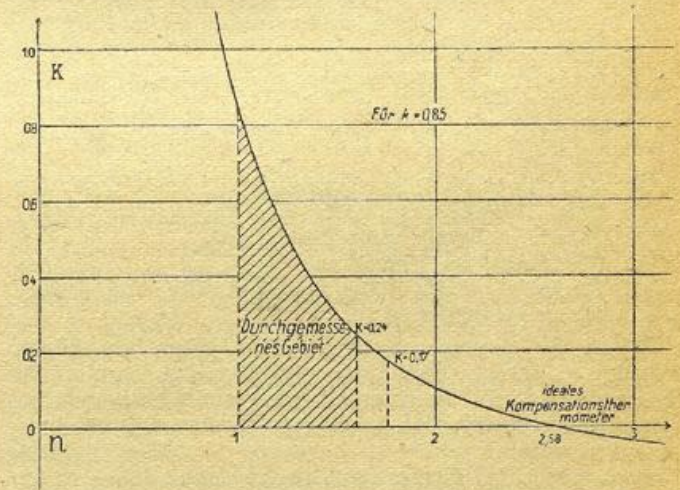


Abb. 18: Graphische Darstellung der Gleichung (24)

In dem schraffierten Gebiet liegen die bis dahin durchgemessenen Düsenthermometer. Damit hat man bereits Werte erreicht, die wesentlich kleiner sind, als die bei den Meteorographen anzubringende Korrekturen, welche für ein  $k = 0,85$  als  $\Delta \delta$  in der Tabelle angeführt sind.

Um mit den Korrekturen in die Größenordnung der Fehler von Bimetallen zu kommen, die nach

K. Wohltmann<sup>1)</sup> und Karl Gödecke<sup>2)</sup> maximal 0,5° C betragen, müßte für eine Geschwindigkeit von 300 km/h ein  $K = 0,17$  dem ein  $n = 1,76$  entspricht, erreicht werden. Ein solches Thermometer wäre als praktisch kompensiert anzusehen, da es außerhalb von Wolken auf 0,5° genau mißt. Innerhalb von Wolken hätte man — wie W. Findeisen<sup>3)</sup> zeigen konnte — im Mittel Werte anzubringen, die um rund 50% kleiner wären, als die in der Tabelle angegebenen Werte. Für die meisten Zwecke besitzt ein solches Thermometer eine hinreichende Genauigkeit. Die Werte von  $K$  und  $n$  für dieses Thermometer sind in der Darstellung Abb. 18 eingezeichnet.

## V. Entwicklung von Wolkenmeßgeräten.

(Versuche von W. Findeisen, G. Schulz und B. Walliser)

Die Bestimmung der Wolkenober- und -untergrenze mehrfach geschichteter Wolken ist im allgemeinen nur mit einem Flugzeug, bzw. Freiballon bei direkter Augenbeobachtung möglich. Die Rückschlüsse aus Feuchtemessungen von Radiosondeaufstiegen geben nicht immer ein naturgetreues Bild der Bewölkung, da eine hohe Feuchte nicht immer eine Wolke darstellen muß. Aus dem gleichen Grunde war auch ein von Wenk, Lindenberg, entwickeltes spezielles Wolkenmeßgerät — Deckname Spatz — nicht unbedingt zuverlässig. Infolgedessen wurde versucht, zu einem leicht zu handhabenden Gerät zu kommen, das nicht die Wasserdampfsättigung meldete, sondern zu einem Gerät, das in der Luft vorhandene Wassertröpfchen, also einwandfreie Wolken anzeigte, und so Angaben von Wolken in wolkenlosem Raum mit großer Feuchte vermied. Da das Gerät nicht, wie etwa Radiosonden, nur vereinzelter Stationen zugänglich sein sollte, sondern wie etwa Höhenwindmeßgeräte in fast jeder Wetterwarte vorhanden sein sollte, wurde ein kleines Gerät angestrebt, das an einem Pilotballon mit 200/min Steiggeschwindigkeit angehängt werden konnte und von jedermann leicht ohne längere Übung sicher zu handhaben war. Das Prinzip des Gerätes war damit klar, und es mußten die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

1. Minimum an Gewicht,
2. Zuverlässige Meldung von Wassertropfen in der Größe von  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  cm, wobei größere Tropfen (Regen) nicht mit gemeldet werden dürfen.
3. Konstante Steiggeschwindigkeit des Gespannes bzw. Möglichkeit der Kontrolle der Steiggeschwindigkeit vom Boden aus.
4. Meldung von Eiswolken,
5. Einfache, stabile Konstruktion, die von jedermann zu bedienen ist.

Wenn die Apparatur einem Pilotballon angehängt werden sollte, war von Anfang an klar, daß sie kleinste Dimensionen mit Fortlassung aller nicht notwendigen Teile haben mußte. Da bereits vorhandenes Gerät verwendet werden mußte — spezielle Neuherstellungen waren wegen der Kriegsverhältnisse unmöglich — wurden die Sender von Radiosonden in entsprechender Weise umgebaut, wobei ihre erprobte Prinzipschaltung beibehalten wurde.

Der Sender konnte in eine kleine handliche Form gebracht werden, nämlich in eine zylindrische Form mit etwa 3 cm Durchmesser und etwa 8 cm Länge. Der Sender wird von einer Hülle aus dünnem Zelluloid

umgeben, deren Oberteil Steckbuchsen für das normale Batteriebündel der Radiosonde sowie Zelluloidstreifen zur Befestigung an der Antenne trägt. Die Antenne ist als Fuchs-Antenne ausgebildet, um den sonst zur Spannung der Antenne erforderlichen Fallschirm mit seinem großen Strömungswiderstand zu ersparen.

Das Anzeigen der Wolken sollte in der Weise erfolgen, daß dem Schwingkreis des ununterbrochen arbeitenden Senders eine Zusatzkapazität parallel geschaltet und damit ein Frequenzsprung ausgelöst wurde. Das Problem war nun, einen geeigneten „Fühler“ zu konstruieren, der bei Berührung mit wasserdampfgesättigter Luft noch nicht, aber beim Auftreten kleinster Wassertröpfchen sofort die Zusatzkapazität einschaltete. Anfangs war dabei an ein feinmaschiges Sieb gedacht, durch das die Wolkenluft geleitet wurde. Dieses Sieb sollte eine Lage feinsten Fäden aus isolierendem Material (Glas) enthalten, die mit zwei einander nicht berührenden feinsten Metallfäden verwebt waren, etwa wie Abb. 19 stark vergrößert skizziert zeigt. Die Ma-

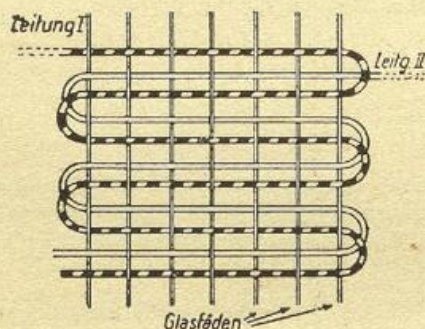


Abb. 19: Netz-Fühler für Wolkenteilchen

schen dieses Netzes sollten so fein sein, daß die in Wolken schwebenden Wassertröpfchen ausreichen, die Leitungen I und II kurz zu schließen und damit die Zusatzkapazität einzuschalten. Beim Verlassen der Wolke, wenn keine neuen Wassertropfen auf das Sieb fallen, wird der Kurzschluß durch Verdampfen der kleinen Wassermenge sofort aufgehoben. Denn die Ventilation infolge der Aufstiegs geschwindigkeit und die zusätzliche Heizung der Kurzschlußstellen durch den Hochfrequenzstrom reichen vollauf aus, um in wolkenfreien Räumen eine sofortige Verdunstung der kurzschließenden Wassertropfen herbeizuführen.

Die Ausführung dieser Einrichtung scheiterte jedoch an der Konstruktion eines geeigneten Siebes wegen seiner schwierigen Herstellung und seiner allzu großen Störanfälligkeit.

Eine andere Idee war die, die Belege eines Plättchenkondensators durch die Wassertropfen kurz zu schließen und dadurch die Schaltung zu betätigen. Plättchen von „Eloxal“ (elektrisch oxydiertes Aluminium) wurden wie in Abb. 20 schematisch wiedergegeben, zu einem Kondensator zusammengesetzt und an einer Seite blank geschliffen. Diese Anordnung war wesentlich leichter und stabiler herzustellen als das Sieb, bewährte sich jedoch nicht, da die Benetzungsfläche sehr klein und schwer in den Luftstrom gebracht werden konnte. Zudem konnten Verunreinigungen oder Oxydation der Schliffflächen den Fühler leicht für den Betrieb unbrauchbar machen.

Eine dritte Form des Fühlers führte nach einer Reihe von Versuchen zu dem gewünschten Erfolg. Ein etwa 2 mm starker Metallstab wurde mit einer schwachen Isolierung versehen und auf diese eine zweite Wicklung aus blankem Draht gelegt.

Die Isolierung mußte so dünn gehalten sein, daß sie leicht durch die feinen Wassertröpfchen aus der Wolkenluft durchfeuchtet und leitend gemacht wurde, so

1) K. Wohltmann, Ann. d. Hydr. 66, 145 (1936)

2) K. Gödecke, Ann. d. Hydr. 66, 534 (1936)

3) W. Findeisen: Ann. d. Hydr. 66, 571 (1938)

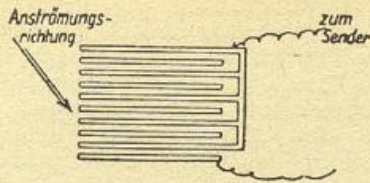


Abb. 20: Kondensator-Fühler für Wolkenteilchen

daß damit zwischen Metallstab und Drahtspirale eine leitende Verbindung hergestellt wurde. Andererseits durfte die Isolierung auch nicht zu viel Wasser in sich aufsaugen, damit ein rasches Verdunsten beim Verlassen der Wolke momentan eine Unterbrechung des Stromes bewirkte. Als Metallstab diente ein etwa 4 cm langer Aluminiumdraht mit 2 mm Durchmesser. Auf ihm waren an den Enden 2 mit je einem Messingring ge-

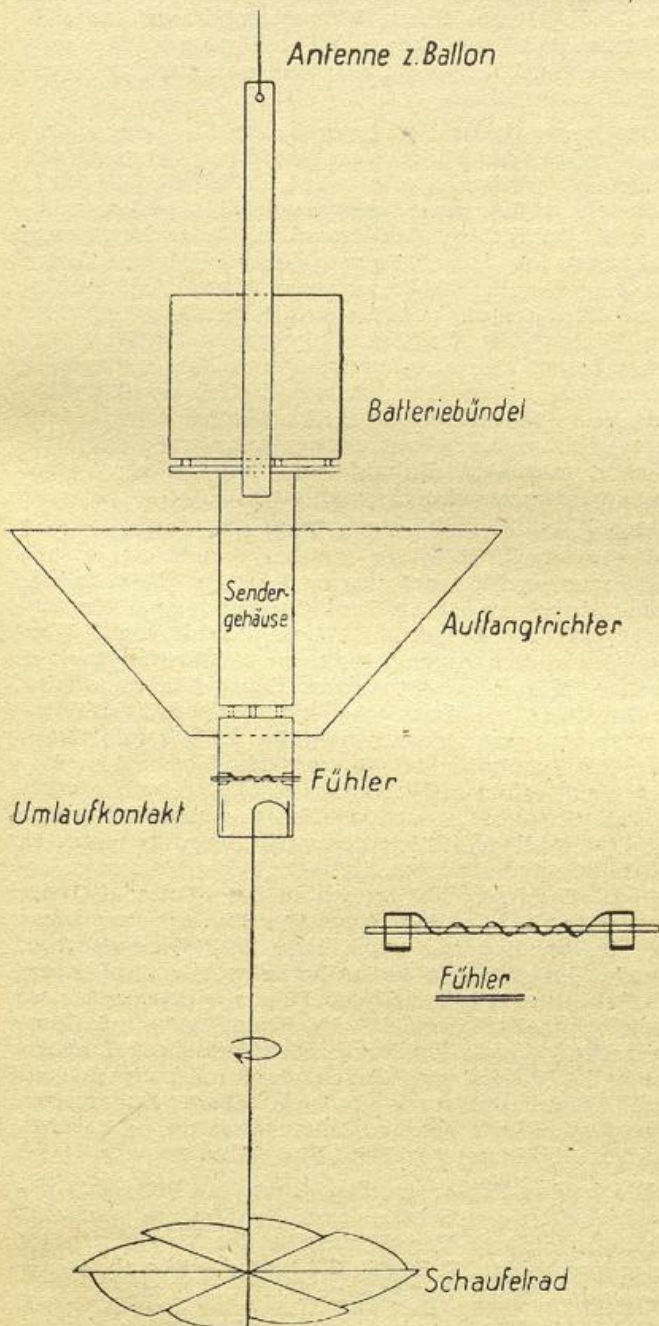


Abb. 21: Schema des Wolkenmeßgeräts „Regenpfeifer I“ (1/2 nat. Größe)

faßte Rollen aus Isoliermaterial (Trollitul) befestigt. Die Messingringe dienten zum Anlöten der Anschlußdrähte; auf ihnen endigte auch die um den Aluminiumdraht gewundene Drahtspirale, die meist aus blankem Kupferdraht von etwa 0,005 mm Durchmesser bestand. Die Art der Isolierung machte bei den gestellten Anforderungen zunächst ziemlich große Schwierigkeiten, da sich die zur Isolierung verwendeten feinen Fäden von Baumwolle, Naturseide oder Kunstseide durch die verhältnismäßig großen Stromstärken beim Kurzschluß derart erhitzen, daß die beiden Leitungen aneinander geklebt wurden und eine selbständige Stromunterbrechung nicht mehr eintrat. Feine Glasfäden als Isoliermaterial halfen diesem Übelstande zwar ab, machten den Fühler mechanisch aber so empfindlich, daß an eine praktische Verwendung nicht zu denken war. Dikere Isolierungen aus Seide oder Baumwolle verhinderten zwar das Kleben, machten die Anordnung aber so träge, daß beim Verlassen der Wolke erhebliche Fehlanzeigen eintreten mußten. Es war also erforderlich, diese Isoliermittel zu verlassen und nach einem anderen zu suchen, was sich auch schließlich im Eloxal fand. Wenn der Aluminiumstab des Fühlers nur kurzfristig eloxiert wurde, kurzfristig leitende Oxidschicht noch so dünn, bzw. nicht in sich geschlossen, daß zwar ein um den Aluminiumstab gewundener blanker Kupferdraht praktisch isoliert war, beim Befeuchten jedoch ein Kurzschluß eintrat, der beim Abtrocknen des Stabes sofort wieder verschwand. Wie eigentlich der genauere physikalische Mechanismus der Vorgänge an diesem Fühler ist, konnte nicht mehr geklärt werden, und man war mit der Tatsache, daß der Fühler funktionierte, zufrieden. Wie weit nun neben der Widerstandsänderung in dem Fühler noch parallel dazu Kapazitätsänderungen eine Rolle spielen, muß dahin gestellt bleiben. Wenn in diesem Zusammenhang von „Kurzschluß“ gesprochen wird, so sind darunter diese beiden möglichen Vorgänge zu verstehen und kein Kurzschluß im engeren Sinne. Zur schnelleren Trocknung der Fühler nach dem Verlassen der Wolken, also zur Herabsetzung der Trägheit der Anzeige, wurde die um den Aluminiumstab gewundene Kupferspirale elektrisch schwach geheizt. Dieser Fühler wurde nun unterhalb des Senders in einem dünnen Zelluloidrohr von 3 cm Durchmesser und etwa 5 cm Länge angebracht, damit er nicht von Regentropfen getroffen wurde und falsche Angaben zustande kamen. Andererseits mußte er aber den feinen Wassertröpfchen in der Wolke ausgesetzt werden. Zu diesem Zweck wurde an dem Fühlergehäuse ein Fangtrichter aus Zelluloid befestigt, dessen Öffnungsdurchmesser etwa 20 cm betrug, also etwa 300 ccm Öffnungsfläche hatte. Durch den Aufstiegsstrom von 200 m/min wurde die Luft in den Trichter gedrückt und durch drei Schlitze in der Größe 0,5 x 2,5 cm zwischen Sendergehäuse und Fühlergehäuse in das Fühlergehäuse hineingepreßt und damit an dem Fühler vorbeigeführt. Größere Tropfen, also Regen, konnten dem gewundenen Luftstrom nicht folgen und blieben im Trichter. Nur die in der Luftmasse schwebenden Tröpfchen gelangten in das Fühlergehäuse, so daß Fehlangaben auf diese Weise ausgeschaltet waren.

Die Aufstiegs geschwindigkeit wurde wie bei Pilotvisierungen durch Auswägen des Ballons mit Anhang und Bestimmung des freien Auftriebs eingestellt, und zwar auf 200 m/min. Zur Kontrolle durchgeführte Doppelanschnitte ergaben eine hinreichende Konstanz der Aufstiegs geschwindigkeiten in den unteren 3000 Metern.

Beim Aufstieg in Wolken kann man den weiteren Verbleib des Ballons visuell nicht verfolgen und über seine Höhenänderung ohne weiteres keine Anhaltspunkte gewinnen, da kein Druckmeßgerät in dem Meßinstrument vorhanden ist. Durch ein langsam sinken-

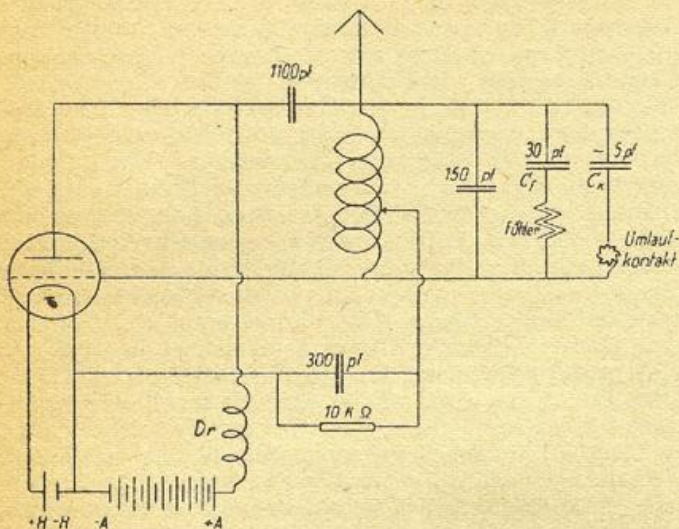


Abb. 22: Schaltschema des Wolkenmeßgeräts „Regenpfeifer I“

des Gerät kann infolgedessen ein völlig falsches Wolkenbild gemeldet werden. Es mußte also eine Vorrichtung geschaffen werden, die entweder das Gerät bei veränderter Aufstiegs geschwindigkeit — etwa bei langsamem Abblasen des Ballons — außer Betrieb setzte oder aber diese veränderte Steiggeschwindigkeit anderweitig erkennen ließ. Ein Platzen des Ballons führt ja in den meisten Fällen zum Zusammenrollen der Antenne und damit einer schlagartigen Intensitätsänderung, so daß ein derartiger Fall beim Abhören ziemlich leicht erkannt wird.

Anders aber, wenn der Ballon langsamer steigt, in gleicher Höhe „schwimmt“ oder langsam fällt. Diese Fälle lassen sich beim Empfang nicht erfassen und eindeutig zuordnen, da die Sendeanlage mitsamt dem Fühler intakt bleibt. Man erhält also ein völlig falsches Bild der Bewölkung. Diesen Fehlermöglichkeiten wurde dadurch begegnet, daß die durch die Aufstiegs geschwindigkeit erzeugte, ziemlich konstante Luftströmung ein Flügelrad antrieb, welches durch einen Schleifkontakt bei jedem Umlauf eine kleine Kapazität in den Schwingkreis des Senders schaltete und kleine Frequenzsprünge verursachte. Die durch das Flügelrad angeschlossene Kapazität mußte so klein sein, daß die Frequenz nicht aus der Hörbreite des Empfängers wanderte, d. h. bei festgehaltener Empfängerstellung sollten sowohl die Grundfrequenz als auch die umgeschaltete Frequenz hörbar sein. Das Aufnahme gerät gestattete Frequenzsprünge von 20 khz nebeneinander zu hören. Dem entspricht eine zusätzliche Kapazität von etwa 1 pF. Diese kleine Kapazität wird allein schon durch die Belege der Kontakte geliefert, so daß eine zusätzliche Kapazität sich erübrigte. Die Zahl der Unterbrechungen pro Minute ist für die Aufstiegs geschwindigkeit durch Eichung festgelegt. Auf diese Art war die Steiggeschwindigkeit des Ballons beim Aufstieg leicht zu kontrollieren, indem man von Zeit zu Zeit mit Hilfe einer Uhr die Kontakte pro Minute zählte. Zugleich wurde hierdurch eine sehr charakteristische Kennung des Gerätes gegenüber anderen störenden Sendern erzielt, so daß eine Verwechslung mit anderen auf gleicher Wellenlänge arbeitenden Sendern völlig ausgeschlossen war. Der schematische Aufbau des Wolkenmeßgerätes — Deckname Regenpfeifer — ist in der Abb. 21 und die Schaltung des Senders mit Fühler und Unterbrechungskontakt in der Abb. 22 wieder gegeben.

Der Sender arbeitete auf etwa  $3,7 \cdot 10^3$  khz mit annähernd konstanter Frequenz, die sich mit wachsender Höhe infolge der Temperaturabnahme nach kleineren Werten verschob. Eine Konstanz der Frequenz ist zum Betrieb des Gerätes zudem nicht erforderlich. Die Antenne war als 40 Meter lange Fuchs-Antenne ausgebildet, deren einer Pol am Ballon und der zweite am Sender befestigt war. Bei starkem Sturm war die Antenne aus dünner Aluminiumlitze oder Messingdraht von 0,1 mm Durchmesser, bifilar auf einer Ablaufrolle mit Luftwiderstandsbremse gegen zu schnelles Ablaufen, gewickelt, so daß ein Mann ohne Schwierigkeiten das Gerät auch bei stärkstem Sturm starten und am Empfänger aufnehmen konnte.

Das beschriebene Gerät „Regenpfeifer I“ gestattete Wolkenmessungen mit einfachen Mitteln vom Boden aus. Es mußte aber unzuverlässig werden, wenn keine Wasser- oder Mischwolken, sondern reine Eiswolken vorlagen, denn in diesen Wolken mußte das Prinzip des Kurzschlusses durch Wassertropfen versagen. Es sei denn, daß Eisteilchen sich zufällig am Fühler festklemmten und bei ihrem eventuellen Schmelzen Kurzschluß verursachten.

Der Regenpfeifer I gibt gegebenenfalls auch falsche Angaben bei durchbrochener Bewölkung, wenn er zufällig eine Wolkenlücke passiert. Es würde in diesem Falle ein wolkenloser Raum gemeldet werden, während in Wirklichkeit eine ziemlich starke Bewölkung vorhanden sein kann. Es war daher erwünscht, neben den Angaben der Wolkgrenzen in der Art des Regenpfeifers I auch noch kontinuierlich Angaben über den Verlauf der Luftfeuchtigkeit zu erhalten, um Fehlangaben der oben geschilderten Art weitgehend auszuschalten. Man kam diesem Ziel in der Entwicklung eines Modells Regenpfeifer II, das aber serienweise nicht mehr gebaut werden konnte, da seine laboratoriumsmäßige Entwicklung erst im April 1945 abgeschlossen wurde, ziemlich nahe.

Man setzte parallel zu dem Fühler im Regenpfeifer I einen zweiten Fühler der gleichen Art. Dieser zweite Fühler unterschied sich von dem ersten Fühler in der Bauart insofern, als die Zahl der Windungen Kupferdraht auf dem eloxierten Aluminiumstab von 5 Windungen auf dem ersten Fühler auf 20 Windungen beim zweiten Fühler erhöht wurde. Seine Vorbehandlung mußte, da er auf Feuchtigkeit und nicht erst auf Wassertropfen ansprechen sollte, eine andere sein. Während der Fühler für den Regenpfeifer I nach dem Eloxieren mit reinstem Wasser gründlich gewaschen wurde, um Chemikalien usw. restlos zu entfernen, wurde bei dem zweiten Fühler angestrebt, Verunreinigungen — allerdings definierter Art — auf dem Fühler zu erzeugen. Dies geschah einfach in der Weise, daß der nach dem Eloxieren gewaschene Fühler eine kurze Zeit in ein Bad mit verdünnter Essigsäure gebracht wurde. Das gebildete Azetat bewirkte dann, daß schon bei Feuchten unter 100 % der Fühler wirkte, und zwar nicht sprunghaft, sondern die Kapazität wurde kontinuierlich je nach dem Feuchtigkeitsgrade der Luft zugeschaltet, so daß eine Feuchtigkeitsänderung sich als eine Frequenzänderung äußerte. Diese Änderungen waren reproduzierbar und hatten etwa das in der folgenden Abbildung gegebene Bild (Abb. 23).

Die beiden Fühler wurden durch das Flügelrad abwechselnd in den Schwingkreis des Senders geschaltet und waren durch Verschiedenheit der Kennungen gut zu unterscheiden. Z. B. gab Fühler I das Signal . — . — . — und Fühler II das Signal . . — . . — . . — . .

Da beide Fühler verschiedene Kapazitäten haben, kann man sie durch schnelles Umschalten auf dem Empfänger — besser durch Aufnahme mit zwei Empfängern — abhören. Bei einer genauen Aufnahme mit

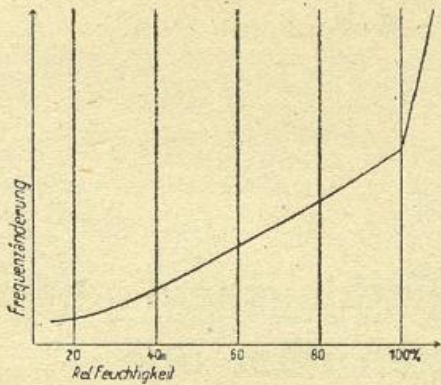


Abb. 23: Frequenzänderungen bei wechselnder relativer Feuchtigkeit

zwei Empfängern erhält man also damit nicht nur die Wolkengrenzen, sondern zugleich ein Bild von der Wolkendichte in jedem Zeitmoment, d. h. in jeder Höhe und aus der Art der Steigerung der Kurventeile kann man auf Einzelheiten innerhalb der Wolke schließen.

Eine Aufnahme mit diesem Gerät liefert etwa das folgende Bild:

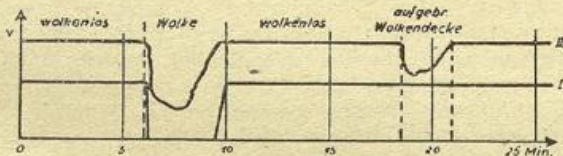


Abb. 24: Aufnahme der Sendungen eines Regenpfeifers mit zwei Fühlern

## VI. Spezielle Wetterflüge.

Neben den Erprobungsflügen für Geräte wurde eine ganze Reihe von reinen Forschungsflügen durchgeführt

mit dem Ziel Bewölkung, Temperatur und Feuchte an Aufgleitflächen, Kaltfronten und Okklusionen zu untersuchen, und zu den auf diesem Gebiet zahlreichen angestellten synoptischen Betrachtungen<sup>1)</sup> ein homogenes Messungs- und Beobachtungsmaterial zu liefern. Die für diese Flüge eingesetzten Maschinen waren mit mehrfachen Meßgeräten für Temperatur und Feuchte, sowie einem mechanischen und elektrischen Meteorographen (Elmet) ausgestattet. Die Flüge waren so angelegt, daß die Fronten in mehrfachen Auf- und Abstiegen geschnitten wurden. Für jede Flugminute wurden bei diesen Flügen die meteorologischen Elemente gemessen. Schwierig war während der Kriegszeit die Ortsbestimmung mit der nötigen Genauigkeit. Es wurde durch gleichzeitige Augenbeobachtung zu den Messungen ein erhebliches Material zusammengetragen, jedoch ist eine wissenschaftliche Auswertung infolge Zeitmangels nicht zustande gekommen.

Oft ist die Frage der Enteisungsanlagen an Flugzeugen von Technikern geprüft worden. Die kostspielige Anlage an Serienflugzeugen sollte erspart werden, jedoch war die Frage nicht mit Sicherheit beantwortet, ob mit jedem blindflugfähigen Flugzeug bei jeder Wetterlage mit starker Vereisung jeder Flug allein auf Grund einer sinnvollen meteorologischen Navigation durchgeführt werden könne. Den Beweis für diese Möglichkeit hat Findeisen anzutreten versucht, indem er bei Vereisungslagen, in denen allgemein vom Überqueren der Alpen auf der Strecke München—Oberitalien und umgekehrt abgeraten wurde, diese mit Flugzeugen vom Muster H 111 und Ju 88 mehrmals zurücklegte, ohne einen wesentlichen Eisansatz, der zum Abbruch des Fluges führte, zu bekommen. Jedoch wäre wohl kaum jemals eine Verallgemeinerung dieser Flüge ratsam gewesen, da im allgemeinen nicht bei jedem Flugzeugführer eine so hohe Kenntnis der meteorologischen Navigation vorauszusetzen ist. Bei den meisten dieser Flüge wurde ja nicht der Flug auf Grund einer Bodenberatung angetreten, sondern die Wahl des Flugweges und der Flughöhe erfolgte meist erst während des Fluges auf Grund meteorologischer Messungen und Beobachtungen.

<sup>1)</sup> Z. B. Künner, Meteor. Z. 56, 249 (1932) Raethjen, Meteor. Z. 56, 263 (1939), G. Schinze u. R. Siegel, Die luftmassenmäßige Arbeitsweise, Wiss. Abh. RfW Sonderband.

# Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes

Herausgegeben vom Reichsamt für Wetterdienst

Reihe B, Nr. 8, Berlin 1942

(Nachdruck)

## Ergebnisse von Wolken- und Niederschlagsbeobachtungen bei Wettererkundungsflügen über See

Von W. Fındeisen, Prag

### I. Zusammenfassungen und Vorbemerkungen

Bei Wettererkundungsflügen wurden die besonderen Erscheinungen der Wolkenstruktur und der Niederschlagsbildung über ausgedehnten Seegebieten (Atlantik, Nordmeer) beobachtet. Dabei wurden Ergebnisse gewonnen, die für die Beurteilung der täglichen Meldungen der über Seegebieten eingesetzten Wettererkundungsstaffeln bedeutungsvoll sind, besonders für die Verwertung dieser Meldungen bei der Wetterdiagnose und bei der Flugberatung.

Die bisher geringe Zahl Flüge (24), bei denen die Beobachtungen durchgeführt werden konnten, reichte nicht aus, soviel Beobachtungsmaterial zu sammeln, wie notwendig ist, um alle der nachstehend besprochenen Fragen sicher und endgültig klären zu können. Mit Rücksicht auf die gegenwärtige Bedeutung der Ergebnisse wird dennoch schon jetzt berichtet. Dabei kann es sich nur um einen vorläufigen Bericht handeln, der durch weitere Beobachtungen und Untersuchungen ergänzt werden muß, bevor ein vollständiges und in allen Punkten gesichertes Bild von den besonderen Erscheinungen der Wolkenstruktur und der Niederschlagsbildung über See gewonnen werden kann.

Schon aus den planmäßigen Meldungen und aus Berichten der Wettererkundungsflieger<sup>1)</sup> geht hervor, daß die Niederschlagsbildung über See oftmals auffällig anders verläuft als über Land. Die Gesetze der Niederschlagsbildung, die durch Flugbeobachtungen über Land gefunden und bestätigt worden sind, gelten über den Seegebieten in mancher Hinsicht scheinbar nicht. Mit den bisherigen flugmeteorologischen Erfahrungen, die sich fast ausschließlich auf Beobachtungen über Land stützen, sind die Meldungen und Berichte aus den Seegebieten oftmals nicht in Einklang zu bringen; sie mußten manchmal geradezu unverständlich erscheinen und waren deshalb im meteorologischen Dienst nicht immer leicht zu verwerten.

Die auffälligste und eigenartigste Niederschlagserscheinung über See ist die der sogenannten Nieselschauer. Sie wird im ersten Teil dieser Arbeit besprochen. Im zweiten Teil wird der für die Regentstehung maßgebliche Vorgang der Eisteilchenbildung behandelt, der in den Wolken über See unter wesentlich erleichterten Bedingungen erfolgen kann als über Land.

<sup>1)</sup> Reg.-Rat Dr. Schwerdtfeger berichtete mir brieflich und gab damit die Anregung zu meinen Untersuchungen.

### II. Nieselschauer

#### a) Erscheinungsform und Erkennungsmerkmale

Bei den Nieselschauern handelt es sich um einen Niederschlag, der aus kleinen, wenig mächtigen Stratocumulus-Wolken fällt, die meistens unterhalb der 0°-Grenze liegen. Er wird von den Wetterfliegern fast immer unter der Bezeichnung „Schauer“ gemeldet. Eine andere Verschlüsselungsmöglichkeit ist gegenwärtig kaum gegeben, und äußerlich besteht tatsächlich, abgesehen von den Größenverhältnissen, große Ähnlichkeit mit einem gewöhnlichen Schauer. Bei äußerlicher Betrachtung dieser „Miniatur-Schauer“ scheint es so, als könnte sich über See bereits in wenig mächtigen Wolken, vor allem ohne den bekannten Umweg über die Eisteilchenbildung, Schauerregen im gewöhnlichen Sinne bilden.

Wolken von geringer Mächtigkeit, besonders Stratocumulus, sind auch über See nicht an besondere Luftmassen oder wetterkartenmäßig erfassbare Massengrenzen gebunden. Wenn dann die mit diesen Wolken verknüpften Niederschlagserscheinungen von den Wettererkundungsstaffeln als „Schauer“ gemeldet werden, d. h. als die für Kaltfronten und labil geschichtete Luftmassen typische Niederschlagsart, so wird damit den auswertenden Meteorologen ein ganz unzutreffendes Bild von der Wetterlage vermittelt, und die Meldungen können ihren Zweck, eine genaue Wetterdiagnose zu ermöglichen, nicht mehr erfüllen.

Schon danach ist zu fordern, daß die genannte Niederschlagserscheinung keinesfalls als „Schauer“ gemeldet werden darf. Darüber hinaus zeigt nun ihre genaue Beobachtung, daß es sich dabei tatsächlich um etwas physikalisch grundsätzlich anderes handelt, als bei einem wirklichen Schauer.

Unter einem Schauer versteht man in der Meteorologie einen eng begrenzten, intensiven und (wenn es sich um Regen handelt) großtropfigen Niederschlag. Die enge Begrenzung ist zwar auch bei den Nieselschauern gegeben. Ferner herrscht scheinbar auch die hohe Niederschlagsintensität, auf die man aus der bemerkenswert großen optischen Dichte der Nieselschauer schließen könnte. Das Merkmal der Großtropfigkeit, dem die physikalisch weniger geschulten Meteorologen vielleicht nur geringe Bedeutung beimessen, ist aber, wie die Untersuchungen zeigen, beim Nieselschauer nicht gegeben. Dieses Merkmal ist also hier das charakteristische. Der Nieselschauer ist eine besondere Art des Sprühregens

und besteht wie dieser aus kleinen Sprühregentropfen, die in großer Zahl nebeneinander vorhanden sind.

Die Feststellung der Tropfengröße ist beim Durchfliegen der Niederschlagszone mit den bei Wettererkundungsstaffeln gebräuchlichen Flugzeugen vom Muster He 111 und Ju 88 nicht leicht, und die Praxis zeigt, daß sich die Beobachter dabei oft täuschen. Die Nieselschauer sind dicht, d. h. in ihnen besteht ein hoher Wassergehalt der Luft, und auf dem hindurchfliegenden Flugzeug schlägt sich also ähnlich viel Wasser nieder wie beim Fluge in einem echten Regenschauer. Das zunächst in Form der kleinen Sprühregentropfen auftreffende Wasser bildet dabei größere Tropfen, die an den Sichtscheiben des Flugzeuges entlangrinnen und ganz ähnliche Größe haben wie beim Durchfliegen großtropfigen Regens, sie sind also keineswegs mit der wirklichen Größe der Niederschlagstropfen vergleichbar.

Wenn die Tropfengröße des Niederschlages an den Sichtscheiben festgestellt werden soll, so dürfen nur die Aufschlagfleckchen beobachtet werden, die von den Tropfen beim Auftreffen und bei dem dabei erfolgenden Zerspritzen erzeugt werden. Sie bestehen aus einer Anhäufung kleinster Tröpfchen auf der Scheibenoberfläche. Die Aufschlagfleckchen sind nur an denjenigen Scheiben gut erkennbar, die einen geringen Anstellwinkel zur anströmenden Luft haben, also nicht an der Kupla und auch nicht an den rein tangential angeströmten Scheiben. Die Form der Aufschlagfleckchen ist meist angenähert elliptisch, wobei ihre größte Ausdehnung natürlich in der Strömungsrichtung liegt. Die Sprühregentropfen, also auch die Tropfen der Nieselschauer, hinterlassen Aufschlagfleckchen von meist etwa 1 auf 3 mm bis zu etwa 2,5 auf 8 mm Größe. Die Aufschlagfleckchen der normalen Regentropfen sind weitaus größer und infolge der großen zerspritzenden Wassermengen nicht sauber abgegrenzt; sie erreichen Größen von einigen Zentimetern und sind deutlich von den Aufschlagfleckchen der Sprühregentropfen unterscheidbar. — Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß bei bestimmten mikrophysikalischen Verhältnissen auch im normalen Regen kleine Tropfen von der Größe der Sprühregentropfen vorkommen. Die geringe Tropfengröße allein ist kein ausreichendes Merkmal für Sprühregen, sondern es ist außerdem die Zahl der auftreffenden Tropfen zu beachten. Diese ist, wie es aus der Mikrophysik der Wolken folgt, im normalen Regen stets viel geringer als im Sprühregen.

Die Feststellung der Tropfengröße durch Beobachtung der Größe der Aufschlagfleckchen kann gelegentlich zu Irrtümern führen. Besser ist oftmals die Methode, durch Hinaushalten der bloßen Hand aus einem Kabinfenster die Tropfengröße an der Aufschlagwirkung zu erfühlen. Diese Methode liegt denjenigen Wetterfliegern, die keine Gelegenheit hatten, bei Flügen mit offenen Flugzeugen unmittelbare Wolkenempfindungen zu sammeln, nicht nahe; sie stellt aber gegenwärtig zweifellos den einfachsten, schnellsten und sichersten Weg dar, einen Anhaltspunkt über die Tropfengröße des Niederschlages zu gewinnen. Wie schon der Kraftfahrer aus Erfahrung weiß, verursachen die Regentropfen beim Auftreffen auf die Haut einen starken Druckreiz, während die Sprühregentropfen kaum einzeln fühlbar sind. Das stark unterschiedliche Empfinden bei den verschiedenen Tropfengrößen ermöglicht eine Beurteilung der Niederschlagsart einfacher, als das auf Grund der Angaben irgendeiner Apparatur geschehen könnte, bei der es sich überdies um einen komplizierten Aufbau handeln müßte.

Es wurde versucht, die bekannte Eosin-Papier-Methode nach Wiesner für eine objektive Bestimmung der Tropfengröße in durchflogenen Regengebieten zu

verwenden. Die Versuche sind aber bisher über Anfänge nicht hinausgekommen.

### b) Die Entstehung der Nieselschauer und ihre meteorologischen Vorbedingungen

Die Entstehung und die eigenartige Erscheinungsform der Nieselschauer kann auf Grund der besonderen thermodynamischen Verhältnisse, die über Seegebieten gegeben sind, erklärt werden.

Hierbei ist die Beständigkeit der Wolkendecken über See von größter Bedeutung. Infolge der gleichmäßigen Beschaffenheit der Meeresoberfläche bleiben die Wolkendecken über See länger erhalten als über Land. Erzwungene Konvektion an Geländeunebenheiten und die mit dem tageszeitlichen Gang der Temperatur verknüpfte thermische Konvektion verursachen über Land immer wieder zumindest stellenweise Auflösung der Wolkendecken. Auch wenn die Wolkendecken im ganzen gesehen scheinbar erhalten bleiben, so ist doch das einzelne Raumelement häufig der Auflösung und Wiedergebilde unterworfen. Die örtlich und tageszeitlich gegebenen wolkenauflösenden Vorgänge fehlen über See, und die größere Beständigkeit der Wolkendecken äußert sich dort schon dadurch, daß viel häufiger als über Land gleichmäßige Wolkenfelder von sehr großer Ausdehnung vorkommen.

Die große zeitliche Beständigkeit bedeutet für das einzelne Raumelement der Wolken, daß es lange Zeit hindurch dem Vorgang ausgesetzt wird, der zur Bildung und Entwicklung der Wolken führt. Dieser Vorgang beruht bei allen Wolkendecken mit „Bodenanschluß“ darin, daß der Wasserdampftransport, der infolge des Massenaustausches zwischen Boden und Luft stattfindet, lange erhalten bleibt. Beständigen Wolkendecken wird lange Zeit hindurch Wasser vom Boden her zugeführt, und ihre Dichte, d. h. ihr Wassergehalt, wird ständig vergrößert.

Die Zunahme der Dichte einer tiefen Stratus- oder Stratocumulusdecke mit der Zeit läßt sich mit Hilfe einer Überlegung rechnerisch abschätzen, die allgemein für die Physik der Schichtwolken grundlegend ist.

Maßgeblich ist hierbei das vertikale Gefälle der spezifischen Feuchte ( $= \frac{dq}{dh}$ ), denn von ihm hängt die Menge des Wasserdampfes ( $= S_w$ ) ab, die durch den Austauschvorgang pro Zeiteinheit vertikal transportiert wird.

Es gilt bekanntlich

$$S_w = \tau \cdot A \cdot \frac{dq}{dh} \quad [g/cm^2 \text{ sec}],$$

wobei für die Austauschgröße A für die hier in Betracht kommenden Verhältnisse etwa der Wert  $A = 30$  [ $cm^{-1} g \text{ sec}^{-1}$ ] einzusetzen ist. Der Wert  $\frac{dq}{dh}$  ist unterhalb der Wolkendecke, im Bereich des trockenadiabatischen Temperaturgradienten, bekanntlich gleich Null. Innerhalb der Wolkendecke gilt z. B. für  $+7^\circ C$  in 500 m Höhe etwa  $\frac{dq}{dh} = -1,7 \cdot 10^{-8} [g/g \text{ pro cm}]$ . Dieser Wert zeigt längs der Feuchtadiabaten, die erfahrungsgemäß in Stratus- und Stratocumulusdecken gut erfüllt ist, bemerkenswert wenig Änderung. Der 2. Differentialquotient  $\frac{d^2 q}{dh^2}$  ist also sehr klein. Daraus folgt, daß der Austauschstrom  $S_w$  innerhalb des ganzen Höhenbereiches einer Wolkendecke nahezu konstant ist und sich nicht bereits in ihrem unteren Teil verliert. Er fließt fast ungeschwächt bis zum obersten Teil der Wolkendecke und kommt diesem zugute; denn noch weiter, über die oberhalb der Decke herrschende Inversion hinaus, dringt er praktisch nicht vor, weil dort der

Austauschkoeffizient sehr klein wird. Der durch den Austausch erzeugte Vertikalstrom des Wasserdampfes verursacht also fortgesetzt eine Wasserdampfung zum obersten Teil der Wolkenschicht. Die Folge davon ist eine ständige Verdichtung dieses Wolkenteiles durch Kondensation.

Wenn die Mächtigkeit der in Betracht kommenden Schicht zunächst einmal mit  $z = 100$  m angenommen wird, so ergibt sich mit den angegebenen Zahlenwerten die zeitliche Zunahme ihres Wassergehaltes

$$\frac{dW}{dt} = \frac{S_w}{z} = 8,5 \cdot 10^{-11} \text{ g/cm}^3 \text{ sec} = 0,2 \text{ g/m}^3 \text{ h.}$$

Dieser Wert bedeutet, daß die Schicht innerhalb von 15 Stunden einen Wassergehalt von  $3 \text{ g/m}^3$  erreicht, also zu einer sehr dichten Wolke wird.

Die Verdichtung macht sich aber in Wirklichkeit nicht ausschließlich im obersten Teil der Wolke bemerkbar, sondern teilt sich den unteren Schichten mit, indem Wasser in Tropfenform von oben nach unten transportiert wird. Das geschieht zum Teil wiederum durch den Austauschvorgang, hauptsächlich aber durch die Fallbewegung der Tropfen. Bei einer bestimmten Wolkendichte, wobei auch die Größe der Tropfen eine entscheidende Rolle spielt, ist die Menge des abwärts transportierten Wassers gleich der Menge des aufwärts transportierten Wasserdampfes. Es stellt sich infolgedessen ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem die Wolkendichte ihren Höchstwert hat.

Mit Hilfe einer Abschätzung (die hier nicht wieder gegeben werden soll), kann man die Größe dieses Höchstwertes für den obersten Teil von Schichtwolken bestimmen. Der maximale Wassergehalt beträgt danach etwa  $2,5 \text{ g/m}^3$ , jedoch in tieferen Schichten, d. h. ab etwa  $100$  m unterhalb der Wolkenobergrenze, nur weniger, weil dort die Tropfen bereits größer sind. Auch die Zeit, die zur Herstellung dieser maximalen Wolkendichte notwendig ist, kann abgeschätzt werden. Danach stellt sich der Wassergehalt von  $2,5 \text{ g/m}^3$  innerhalb von 1—2 Tagen ein. Es ergibt sich also, daß eine tiefliegende Wolkendecke, die während der Dauer von 1—2 Tagen erhalten bleibt, besonders im oberen Teil sehr dicht wird.

Bei der Abschätzung wurde stets vorausgesetzt, daß sich der vertikale Wasserdampftransport nicht erschöpft. Das trifft bei tiefliegenden Wolkendecken über See zweifellos zu, aber wohl nicht immer über Land, und schon hierin kann eine der Ursachen für die Verschiedenheit der Verhältnisse über Land und See erblickt werden. Ganz bestimmt gelten die Zahlenwerte nicht für Wolkendecken ohne Bodenanschluß, bei denen der Wasserdampf nur von den darunterliegenden Luftschichten geliefert werden kann oder bei denen die Ursachen der Wolkenbildung überhaupt ganz andere sind. Es ist klar, daß bei diesen Wolken andere Eigenschaften erwartet werden müssen als bei tiefen Wolkendecken über See. Vor allem kann bei den tiefen Wolkendecken über Land nicht mit einer so hohen Verdichtung wie über See gerechnet werden, weil die Lebensdauer der einzelnen Raumelemente der Wolkendecken nicht die Zeit von 1—2 Tagen erreicht.

Auf die Dichte der Wolken kommt es aber in diesem Zusammenhange an, denn sie ist bis zu einem gewissen Grade für das Größenwachstum der Tropfen maßgebend. Wie bekannt ist<sup>1)</sup>, wachsen die Wolkentropfen im wesentlichen durch Koagulation, d. h. durch Zusammenfließen mit anderen Tropfen bei der Berührung. Das kann um so mehr geschehen, je mehr Tropfen in der Raumeinheit der Wolken vorhanden sind, also je dichter die Wolken sind. Zwar wird dem Weiterwachsen der Tropfen beim Radius von etwa  $0,1 \text{ mm}$  allmählich eine Grenze gesetzt, aber abgesehen davon können sich in dichten Wolken leichter größere Tropfen bilden als in dünnen.

Das ist schließlich für die Niederschlagsneigung der Wolken von entscheidender Bedeutung. Wie früher gezeigt wurde<sup>2)</sup>, besitzen nämlich nur die größeren Tropfen die Fähigkeit, beträchtliche Strecken in wolkenfreier, also nicht wasserdampfgesättigter Luft zu durchfallen. Die kleinen Wolkentropfen verdampfen schon nach wenigen Zentimetern oder Metern Fallweg außerhalb der Wolke; jedoch bleiben die Tropfen von der Größenanordnung  $r = 0,1 \text{ mm}$ , also diejenigen, die als Sprühregentropfen in dichten Wolken entstehen können, noch längs einer Fallstrecke von einigen hundert Metern unterhalb der Wolkendecke als Tropfen erhalten. Sie können also bei geringer bis mäßiger Wolkenhöhe den Boden als Niederschlag erreichen.

Nach allem ist es verständlich, daß die Wolkendecken über Seegebieten im allgemeinen stärker zur Sprühregenbildung neigen müssen als über Land. Es ist nur noch zu erklären, weshalb der Sprühregen oft in begrenzten Feldern in Form der „Nieselschauer“ auftritt.

Hierbei sind offenbar Vertikalbewegungen der Luft maßgeblich beteiligt. Die Nieselschauer sind anscheinend auf diejenigen Felder beschränkt, in denen eine abwärts gerichtete Luftbewegung besteht. In den Feldern mit aufwärts gerichteter Strömung können die Nieseltropfen nicht fallen, weil ihre Fallgeschwindigkeit, die ihrer Größe entsprechend sehr wahrscheinlich nicht mehr als  $1 \text{ m/sec}$  beträgt, die Vertikalgeschwindigkeit der Luft in diesen Feldern nicht merklich übertrifft. In den Bereichen der abwärts gerichteten Luftbewegungen hingegen wird die Fallbewegung der Tropfen stark unterstützt. Dort fallen nicht nur die größeren Tropfen, sondern auch die kleineren Wolkenelemente werden abwärts bewegt, und es entsteht unter der Wolke förmlich ein Fallstreifensack.

In der abwärts strömenden Luft tritt natürlich die bekannte adiabatische Erwärmung ein, und diese führt zur erhöhten Wasserdampfaufnahme der Luft, infolgedessen zum teilweisen Verdampfen der Tropfen. Dabei können aber nicht annähernd alle Tropfen verdampfen, sondern nur die kleinsten. Denn erstens reicht die Zeit normalerweise nicht zur Verdampfung der großen Tropfen aus, und zweitens ist der Wassergehalt der Wolken viel zu groß, als daß alles Tropfenwasser bei dem feuchtadiabatischen Prozeß untergebracht werden könnte. Der Vorgang der Abwärtsbewegung von Schichtwolken ist aus diesem Grunde nicht mit dem der Abwärtsbewegung von Quellwolken (sofern es sich um reine Wasserwolken handelt) zu vergleichen. Der Wassergehalt der Quellwolken entspricht thermodynamisch genau der Höhenlage über dem Kondensationsniveau, und ein Absinken der Wolke unter dieses Niveau, das mit der Wolkenbasis übereinstimmt, hat ihre Auflösung zur Folge. Hingegen ist der Wassergehalt der infolge des Austauschvorganges gewachsenen Schichtwolke erheblich größer. Der abwärts bewegte Teil der Schichtwolke behält infolgedessen noch mehrere hundert Meter unterhalb der allgemeinen Wolkenuntergrenze einen hohen Betrag seines Wassergehaltes und damit auch seiner optischen Dichte bei. Auf diese Weise entsteht äußerlich der Eindruck dichter Schauer in den Feldern, in denen ein abwärts gerichteter Luftstrom herrscht. In Wirklichkeit handelt es sich um einen herabhängenden Wolkenteil.

Die Existenz der angenommenen Vertikalbewegungen der Luft ist nicht direkt nachgewiesen worden, sie darf aber nach den Beobachtungen angenommen werden. Anscheinend gehen die Vertikalbewegungen nur mit Geschwindigkeiten von kaum mehr als  $1 \text{ m/sec}$  vor sich. Ihre Ursache kann nur in einer Labilisierung der vorhandenen Schichtung bestehen. Das wäre z. B. beim

<sup>1)</sup> Meteor. Z. 56, 365 (1939).

<sup>2)</sup> Meteor. Z. 56, 453 (1939).

Vordringen kühlerer Luftmassen gegeben; in diesem Falle müßten aber die Nieselschauer an zumindest schwach ausgeprägte Luftmassengrenzen gebunden sein. Das relativ häufige Auftreten der Nieselschauer in Küstennähe, auf das manche Beobachtungen hindeuten, läßt vermuten, daß der Temperaturunterschied Land-See hierbei eine Rolle spielen kann. Bestimmt ist aber das Auftreten der Nieselschauer nicht mit wetterkartenmäßig erkennbaren Luftmassengrenzen verknüpft, an denen ja bekanntlich meist erheblich größere Vertikalgeschwindigkeiten auftreten als 1 m/sec. Die Nieselschauer stellen normalerweise einen luftmasseneigenen Niederschlag dar.

Offenbar werden die Vertikalbewegungen vorwiegend durch Umlagerungen innerhalb der gleichen Luftmasse erzeugt. Die hierzu nötige Instabilität kann auf zweierlei Weise entstehen: erstens durch die Temperaturerniedrigung der Wolkendecke infolge der nächtlichen Ausstrahlung und zweitens durch die zusätzliche Belastung der Wolkenluft, die durch den Gehalt an Tropfen gegeben ist. Der erste Vorgang reicht quantitativ wahrscheinlich aus, aber auch der zweite ist bei den hohen Wassergehalten der Schichtwolken über Seegebieten zu beachten. Denn, wie sich leicht zeigen läßt, kommt ein Wassergehalt von 2,5 g/m<sup>3</sup> dichtemäßig einer Temperaturerniedrigung von 0,6° gleich und kann bei reibungsloser Strömung längs einer Fallstrecke von 200 m eine Vertikalgeschwindigkeit von 2 m/sec verursachen. Welcher von beiden Vorgängen der wesentlichere ist, könnte nur auf Grund der Beobachtung des tageszeitlichen Ganges der Häufigkeit der Nieselschauer entschieden werden.

Nach allem zeigt sich, daß die Erscheinung der Nieselschauer thermodynamisch befriedigend erklärt und verstanden werden kann und nicht im Widerspruch zu den a. a. O. vom Verf. vertretenen Anschauungen über die mikrophysikalischen Vorgänge in Wolken stehen.

Wenn man noch nach weiteren Erklärungsmöglichkeiten für die Ursachen der Nieselschauer suchen will, so ist es nächstliegend, hierzu den Koagulationsvorgang zu betrachten. Nach der für geringe Tropfengrößen experimentell bestätigten Theorie von der Koagulation der Wolkentropfen<sup>1)</sup> wäre zu erwarten, daß sich in Wasserwolken von etwa 1000 m Mächtigkeit mittelgroße Regentropfen bilden können. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß in Wirklichkeit nur Tropfen von höchstens Sprühregentropfengröße entstehen. Größere Tropfen werden nicht gebildet. Dem fortgesetzten Größenwachstum der Tropfen durch Koagulation ist also offenbar im Größenbereich der Sprühregentropfen eine Grenze gesetzt. Es wird irgendein Koagulationshindernis wirksam, dessen Art noch nicht bekannt ist.

Man kann vorläufig nur sagen, daß es sich entweder um einen aerodynamischen Effekt bei der Tropfennäherung handeln muß oder um einen Effekt, der mit der Oberflächenbeschaffenheit der Tropfen zusammenhängt. Wenn dieser letztere Fall gegeben ist, so ist es denkbar, daß die Oberflächenbeschaffenheit der Tropfen über Seegebieten eine andere ist als über Land und das Zusammenfließen in den Wolken über See infolgedessen leichter erfolgen kann. Es wäre aber dann zu überlegen, aus welchem Grunde die Nieselschauer nicht auch über Landgebieten auftreten, wenn dorthin frische maritime Luftmassen gelangen, sondern höchstens noch in Küstennähe; sie kommen nämlich offenbar nur noch in der Küstenzone vor, in der die über See entstandenen Wolken erhalten bleiben. Ferner wäre zu überlegen, weshalb gelegentlich auch über See Quellwolken beobachtet werden, die ebenso wie über

Land nur kleine Tropfen enthalten, denn auch das zeigten die Beobachtungen bei den Erkundungsflügen über See. Es erscheint also wenig aussichtsreich, mit dieser Erklärungsweise weiterzukommen, und deshalb muß der thermodynamischen Erklärungsweise, die an Bekanntes anschließt, der Vorzug gegeben werden.

### III. Eisteilchenbildung

Der für die Niederschlagsbildung (ausgenommen Sprühregenbildung) entscheidende Vorgang ist bekanntlich die Entstehung der Eisteilchen in der Atmosphäre<sup>1)</sup>.

Der Vorgang der atmosphärischen Eisteilchenbildung wurde in qualitativer und quantitativer Hinsicht in den letzten 6 Jahren vom Verf. zum Gegenstand zahlreicher Beobachtungen und experimenteller Untersuchungen gemacht, bei denen es übrigens u. a. im Jahre 1938 erstmals gelang, ihn im Laboratorium nachzuahmen. Ein ausführlicher Bericht hierüber folgt an anderer Stelle, und es wird dabei dann auch zu einigen inzwischen erschienenen Schriften Stellung genommen werden, in denen z. T. der Vorgang der atmosphärischen Eisteilchenbildung in unrichtiger Abwägung der meteorologischen Gegebenheiten in ein falsches Licht gerückt wird.

Hier sollen nur die Beobachtungen über die Eisteilchenbildung in den Wolken über Seegebieten beschrieben werden. Dabei kam es darauf an, möglichst diejenigen Grenztemperaturen festzustellen, die für die erste Entstehung der Eisteilchen charakteristisch sind. Der Zweck der Beobachtungen war, auch in dieser Hinsicht den Unterschied zwischen den maritimen und kontinentalen Verhältnissen festzustellen, also die für die Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen über See mit denjenigen Temperaturen zu vergleichen, die früher über Land beobachtet wurden.

Die Beobachtungen hatten das bemerkenswerte Ergebnis, daß die Eisteilchen über See meist schon bei erheblich höheren Temperaturen entstehen als über Land.

#### a) Beobachtungsmethoden

Die Feststellung der Temperaturen, die für den Beginn der Eisteilchenbildung charakteristisch sind, ist nicht einfach. Näherliegend ist es, hierzu jeweils eine Anzahl verschieden mächtiger Quellwolken zu beobachten, von denen diejenigen mit großer Gipfelhöhe Eisteilchen enthalten, diejenigen mit kleiner Gipfelhöhe hingegen nicht, und dann zu untersuchen, von welcher Gipfelhöhe ab Eisteilchengehalt auftritt. In dieser Höhe muß dann in den Wolken gerade die kritische Temperatur herrschen. Bei der Bestimmung der Temperatur ist aber zu beachten, daß die Quellwolken in Gipfelnähe kälter sind als die sie umgebende Luft. Das hängt mit der Tatsache zusammen, daß zumindest der obere Teil der Quellwolken stets über die thermodynamische Gleichgewichtslage hinaus emporgewachsen ist.

Der Eisteilchengehalt der Wolken kann entweder durch Auffangen der Teilchen beim Durchfliegen oder durch Beobachtung der äußeren Erscheinungsform der Wolken festgestellt werden.

Sicherer ist die Methode des Durchfliegens, aber auch hierbei können den in dieser Hinsicht ungeübten Beobachtern sehr leicht Irrtümer unterlaufen. An den Sichtscheiben der Kanzel kann man die Eisteilchen nicht erkennen. Sie werden nur dann deutlich sichtbar, wenn sie sich auf einem dunkel gefärbten Körper absetzen. Man kann die Eisteilchen mit aus

<sup>1)</sup> Gerl. Beitr. z. Geophys. 35, 291 (1932); Meteor. Z. 56, 365 (1939).

<sup>1)</sup> Meteor. Z. 55, 121 (1938).

dem Flugzeug herausgehaltener Hand auf dem Handschuh auffangen, oder man kann an der dunkel gefärbten Stirnkante der Tragfläche beobachten, ob sich dort neben den Wassertropfen (die natürlich Vereisung verursachen) auch Eisteilchen niederschlagen. Verf. benutzt seit 6 Jahren nach Möglichkeit eine außen am Flugzeugrumpf angebrachte schwarze Stange von 1 bis 2 cm Durchmesser und etwa 20 cm Länge, an der die auftreffenden Eisteilchen (und übrigens auch die Vereisungserscheinungen) sehr gut vom Beobachtersitz aus erkennbar sind. Natürlich können auch besondere Aufnahmegeräte, die mit Sieben ausgerüstet sind, gut verwendet werden<sup>1)</sup>. Gelegentlich wird der Eisteilchengehalt der durchflogenen Wolken sogar im Innern des Flugzeuges fühlbar, wenn die Eisteilchen in großer Zahl durch unscheinbare Undichtigkeiten in die Kabine eindringen, dort schmelzen und einen sehr feinen Regen erzeugen; deutlich tritt das aber nur beim Fluge in dichten, feinteiligen Eiswolken ein.

Wenn der Eisteilchengehalt der Quellwolken durch Beobachtung der äußeren Form festgestellt werden soll, so ist zu beachten, daß auf diese Weise meist erst im vorgeschrittenen Entwicklungsstadium der Wolken sichere Rückschlüsse möglich sind. Aufsteigende Wolkenmassen enthalten zunächst so viele Wassertropfen, daß gleichzeitig vorhandene Eisteilchen nicht in der äußeren Form der Wolken zur Geltung kommen. Der Eisteilchengehalt der Mischwolken<sup>2)</sup> wird äußerlich erst dann erkennbar, wenn die Eisteilchen auf Kosten der Tropfen stark gewachsen sind und die aufwärts gerichtete Luftbewegung aufgehört oder sich sogar umgekehrt hat, so daß die Wassertropfenmenge infolge von Verdampfung vermindert wurde. Das Reststadium der Quellwolken läßt schließlich keinen Zweifel mehr offen, ob es sich um Wasserwolken oder um Mischwolken handelte; das wurde bereits früher veranschaulicht<sup>3)</sup>. Es ist jedoch schwierig, aus Beobachtungen des Reststadiums von Quellwolken die für die Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen abzuleiten, weil ja die Wolken im Reststadium bereits eine stark verminderte Gipfelhöhe haben. Da der Entwicklungsgang der Quellwolken bei der Beobachtung vom Flugzeug aus normalerweise nicht abgewartet und verfolgt werden kann, dürfen Restwolkenbeobachtungen nur mit großen Vorbehalten verwertet werden. Allerdings ist es gelegentlich möglich, auf Grund der besonderen meteorologischen Verhältnisse auf die ursprüngliche Höhe von Quellwolkenresten zu schließen. Manchmal geben auch gleichzeitig vorhandene andere Quellwolken, die sich in einem früheren Entwicklungsstadium befinden, brauchbare Anhaltspunkte. Bestimmt können aber auf diese Weise ganz erhebliche Irrtümer entstehen. Sie sind tatsächlich bereits manchen Beobachtern, nicht nur Wetterfliegern, unterlaufen, die dann zu ganz unmöglichen Werten für die Gipfelhöhen und die Tiefsttemperaturen von Cumulonimben gekommen sind.

Auch die Feststellung der charakteristischen Temperaturen durch Beobachtung von Schichtwolken stößt auf Schwierigkeiten. Man kann hierbei so gut wie nie durch Vergleich von gleichzeitig in verschiedenen Höhen vorhandenen Wolken, von denen die einen Eisteilchen enthalten, die anderen hingegen nicht, die charakteristische Temperatur für die Eisteilchenbildung feststellen, sondern nur durch statistische Bearbeitung der Beobachtungsergebnisse an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten. Hierzu ist ein großes Beobachtungsmaterial nötig, wie es für die Seegebiete

gegenwärtig noch nicht zur Verfügung steht. Aber auch damit sind keine exakten Rückschlüsse möglich, weil bei den Schichtwolken noch häufiger als bei den Quellwolken die Höhen, in denen Eisteilchen beobachtet werden, nicht mit der Ursprungshöhe der Eisteilchen identisch sind. Bei den Schichtwolken wird die Täuschung durch die Fallbewegung der Eisteilchen hervorgerufen, die, wie besonders bei Altostratus und Nimbostratus bekannt ist<sup>4)</sup>, zu sehr bedeutenden Höhenverlagerungen führen kann. Bei einer wahllosen statistischen Bearbeitung von Schichtwolkenbeobachtungen ist demnach zu erwarten, daß sich zu hohe Werte für die charakteristischen Temperaturen ergeben. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Quellwolkenbeobachtungen ist das auch noch aus einem anderen Grunde zu erwarten, der unten näher besprochen wird.

#### b) Die für die Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturwerte

Die Zahl der bei den Flügen des Verf. über See gewonnenen Schichtwolkenbeobachtungen war bisher sehr gering, und es können daraus infolgedessen noch keine sicheren Rückschlüsse auf die für Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen abgeleitet werden. Auch das bei den Wettererkundungsstaffeln vorliegende Beobachtungsmaterial konnte noch nicht in der besprochenen Richtung bearbeitet werden, da es infolge der hierfür meist wenig günstigen Anlage der Erkundungsflüge noch nicht genügend reichhaltig ist. Wie es scheint, ist dieses Material auch infolge der verschiedenen Erfahrung der Beobachter zu inhomogen. Einzelne Beobachtungen des Verf. und einzelne anscheinend gesicherte Angaben anderer Beobachter deuten aber darauf hin, daß die Eisteilchenbildung in den Schichtwolken über See bei erheblich, schätzungsweise um 6° höheren Temperaturen einsetzt als normalerweise über Land, wenn für die Landbeobachtungen die Statistik von W. Peppeler<sup>5)</sup> zugrunde gelegt wird.

Die Untersuchungen einzelner Quellwolken über Seegebieten ergaben eine noch stärkere Erhöhung der für den Beginn der Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen gegenüber den Werten, die vom Verf. früher über Land beobachtet wurden. Wie schon über Land festgestellt wurde, schwanken auch über See die kritischen Temperaturen manchmal von Tag zu Tag. Der Mittelwert liegt über See etwa bei den Temperaturen  $-6^{\circ}$  bis  $-8^{\circ}$  C, hingegen über Land (wie noch an anderer Stelle im einzelnen berichtet werden soll) um rund 10° tiefer!

Hierbei ist berücksichtigt worden, daß die charakteristische Temperatur grundsätzlich nicht scharf definiert ist. Diese Tatsache haben bereits vor 4 Jahren die schon erwähnten früheren Untersuchungen im Laboratorium und in der Atmosphäre ergeben. Ähnlich wie bei der Tropfenbildung, bei der nach den Messungen von Junge<sup>6)</sup> die einzelnen Kerne infolge ihrer verschiedenen guten Eignung nicht gleichzeitig, sondern nacheinander bei verschiedenen Übersättigungsbeträgen erfaßt werden, ist der Beginn der Eisteilchenbildung nicht an eine ganz bestimmte Temperatur gebunden. Er ist einem nicht eng begrenzten Temperaturbereich zuzuordnen, in dem die Zahl der entstehenden Eisteilchen von Null (an der oberen Grenze des Bereiches) bis auf einen hohen Wert zunimmt. Infolgedessen bilden sich in manchen Quellwolken, die keine besonders tiefen Temperaturen erreichen, nur ganz wenige Eisteilchen, in anderen hingegen, die bis zu tie-

<sup>1)</sup> H. Berg, Wiss. Abh. d. R. f. W., Bd. III, Nr. 8.

<sup>2)</sup> Diese Bezeichnung wurde schon früher in der D (Luft) 1209 für Wolken gewählt, die Eisteilchen und (unterkühlte) Wassertropfen nebeneinander enthalten.

<sup>3)</sup> Ztschr. f. ang. Met. 57, 176 (1940).

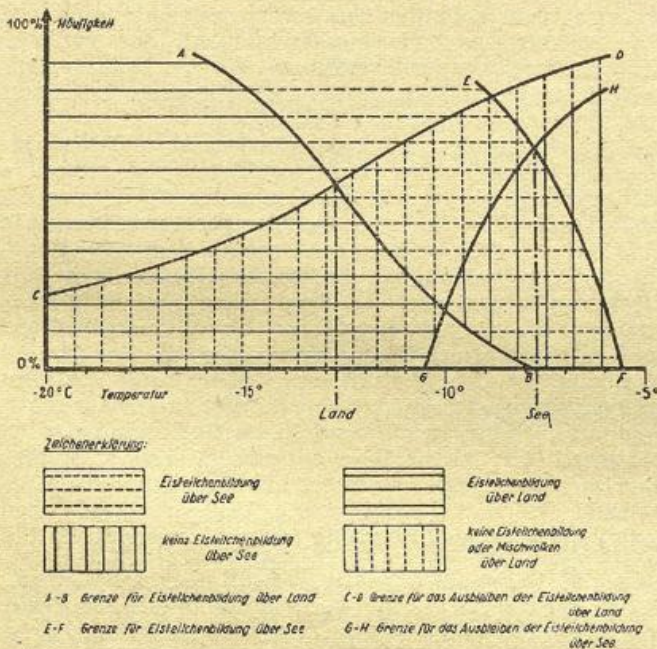
<sup>4)</sup> Meteor. Z. 55, 121 (1938).

<sup>5)</sup> W. Peppeler, Forsch. u. Erf.-Ber. des R. W. D., Reihe B, Nr. 1.

<sup>6)</sup> Chr. Junge, Gerl. Beitr. z. Geophys. 46, 108 (1936).

feren Temperaturen vordringen, sehr viele Eisteilchen. Beim Vergleich der Bedingungen für die Eisteilchenbildung muß also nicht nur das Vorhandensein oder Fehlen von Eisteilchen überhaupt, sondern soweit möglich auch die Zahl der Eisteilchen beachtet werden.

Um ein vollständiges Bild von den Vorbedingungen für Eisteilchenbildung über Seegebieten zu gewinnen, wurden die Beobachtungen, die von einer in Westfrankreich eingesetzten Wettererkundungsstaffel in der Zeit vom September 1940 bis April 1941 bei täglichen Flügen über dem Atlantik gesammelt wurden, einer statistischen Bearbeitung unterzogen. Hierbei konnten natürlich nicht einfach jeweils die Wolkenbeobachtungen des Streckenfluges mit den Temperaturangaben des Höhengaufstieges verglichen werden, sondern es war nötig, in jedem Einzelfall auf Grund der Entfernungsverhältnisse und der Wetterlage zu prüfen, ob die Temperaturmessung für den jeweiligen Ort der Wolkenbeobachtungen noch als gültig angesehen werden konnten. In die Statistik konnten nur Quellwolkenbeobachtungen aufgenommen werden, da die Schichtwolkenbeobachtungen zu wenig zahlreich und vielfach unsicher waren.



Quellwolkenstatistik nach Beobachtungen über statistik nach W. Peppler für Landgebiete. Seegebieten; zum Vergleich Werte aus der Wolken-

Bei der Statistik wurde im Prinzip ähnlich verfahren wie bei den oben beschriebenen speziellen Wolkenbeobachtungen: Es wurden einerseits diejenigen Fälle vermerkt, in denen Eisteilchenbildung bei bestimmten Temperaturen sicher eingetreten war, andererseits diejenigen Fälle, in denen sie wiederum bei bestimmten Temperaturen ausblieb. Hierbei interessierte nur der Temperaturbereich in der Nähe der charakteristischen Temperaturen, und in diesem Bereich standen für die Statistik insgesamt 76 Beobachtungen zur Verfügung. Trotz sorgfältiger Prüfung aller Beobachtungen befinden sich darunter sicherlich etliche unzutreffende, und es haftet dieser Statistik ebenso wie wohl jeder anderen meteorologischen Statistik auch noch aus anderen Gründen eine Streuung an, durch die der schon an sich nicht scharf definierte Wert für die charakteristische Temperatur der Eisteilchenbildung noch unsicherer wird.

Dennoch läßt sich das Ergebnis leidlich mit dem Ergebnis der Wolkenstatistik von W. Peppler<sup>1)</sup> vergleichen, wie die Abbildung veranschaulicht. Dazu ist allerdings zu bemerken, daß W. Peppler in seiner Statistik, die ja nicht auf die hier behandelte Frage zugeschnitten ist, 1. nicht nur Quellwolken, sondern auch Schichtwolken aufgenommen hat und 2. nicht zwischen Wasserwolken und Mischwolken unterscheidet. Beim Vergleich mit Quellwolkenbeobachtungen wird durch das erste ein zu hoher Bereich der kritischen Temperatur für die Eisteilchenbildung vorgetäuscht, durch das zweite hingegen ein zu tiefer Bereich. Wie sich beides quantitativ auswirkt, läßt sich schwer sagen. Trotzdem wird mit der Abbildung das bereits bei den einzelnen Beobachtungen festgestellte Ergebnis zweifellos erhärtet. Sicher ist danach, daß die Kurve, von der ab nach tieferen Temperaturen zu Eisteilchenbildung eintritt (waagerechte Schraffur), über See bei höheren Temperaturen liegt als über Land. Der Schnittpunkt der Kurvenpaare bedeutet gleiche Häufigkeit für den Eintritt und für das Ausbleiben der Eisteilchenbildung. Er liegt bei den Seebobachtungen bestimmt bei höherer Temperatur als bei den Landbeobachtungen, wenn auch die Bedeutung der zweiten Kurve für die Landbeobachtungen hier unklar ist. Der Vergleich der Schnittpunkte der Kurvenpaare ergibt bei den Seebobachtungen eine um 4 bis 5° höhere kritische Temperatur als bei den Landbeobachtungen. Wahrscheinlich ist der tatsächliche Unterschied noch größer.

**c) Folgerungen und Erklärungsversuche**

Die Ursache für die bedeutende Verschiedenheit der für die Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen über See und Land kann noch nicht sicher angegeben werden. Wenn man von der alten Annahme von A. Wegener ausgeht, nach der die Sublimationskerne Quarzteilchen sind, die naturgemäß von den Kontinenten stammen müssen, so überrascht der Befund besonders. Denn es wäre nach Wegener doch zu erwarten gewesen, daß über See erheblich ungünstigere Bedingungen für die Eisteilchenbildung herrschen als über Land. Die Beobachtungen liefern somit das für die Wolkenforschung sehr wichtige Ergebnis, daß die Eisteilchenbildung in der Atmosphäre nicht an kontinentale Kernquellen gebunden ist.

Man könnte nun sogar umgekehrt annehmen, daß vorwiegend über See diejenigen Kerne produziert werden, die die Eisteilchenbildung wesentlich erleichtern. Für diese Annahme können aber nach dem heutigen Stande der Forschung keine weiteren Stützen gefunden werden.

Es ist jedoch denkbar, daß die bekannte Verminderung der Zahl der Kondensationskerne über Seegebieten in diesem Zusammenhange eine Rolle spielt. Bekanntlich haben alle Messungen der Kondensationskernzahl auf See oder bei Seewind an der Küste, die von einer Reihe von Forschern, zuerst von Aitken selbst, durchgeführt wurden, im Gegensatz zu den Messungen im Binnenland verhältnismäßig sehr geringe Werte ergeben. Zwar reichen auch diese geringen Kernzahlen im allgemeinen zur Bildung von Wasserwolken aus, aber es ist möglich, daß dabei merklich höhere Übersättigungen auftreten, weil der überschüssige Wasserdampf nur langsam von den wenigen entstehenden Tropfen aufgenommen werden kann. Die Folge davon ist eine andere Auswahl der Kerne, d. h. es werden bei der Bildung von Wasserwolken über See noch Kerne wirksam, die über

<sup>1)</sup> W. Peppler, l. c. Tab. 19 u. Tab. 35

Land nicht erfaßt werden, weil die hierzu notwendigen Übersättigungen über Land infolge des Vorhandenseins von einer ausreichenden Zahl von besser geeigneten Kernen nicht auftreten. Gerade die Tropfenbildung an den weniger geeigneten Kernen könnte nun für die spätere Eisteilchenbildung entscheidend sein, wenn es sich nämlich bei diesen Kernen um eine Teilchenart handelt, die die früher besprochenen Eigenschaften der Sublimationskerne hat; das sind Wasserunlöslichkeit und eisähnliche Gitterstruktur. Diese Kerne könnten dann schon bei verhältnismäßig hohen Temperaturen ein Gefrieren der an ihnen gebildeten Wassertropfen hervorrufen, und damit wäre die Eisteilchenbildung gegeben.

Die Eisteilchenbildung müßte hiernach im ersten Stadium auf dem Umwege über die Tropfenbildung erfolgen. Auf Grund von Flugbeobachtungen und auf Grund der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen hat Verf. bereits vor Jahren<sup>1)</sup> mitgeteilt, daß die Eisteilchenbildung vorwiegend, vielleicht stets erst dann erfolgt, wenn vorher Tropfen gebildet worden sind. Andererseits sei hier erwähnt, daß spätere experimentelle Befunde (1940) die Möglichkeit für die Eisteilchenbildung ohne vorherige Tropfenbildung bei nicht sehr tiefen Temperaturen ergeben haben. Damit werden übrigens die Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen von Krastanow<sup>2)</sup> in dieser Hinsicht eindeutig widerlegt. Hingüber wird an anderer Stelle ausführlich berichtet werden.

Ob die genannte Erklärung berechtigt ist, kann nicht entschieden werden, bevor nicht eingehende Untersuchungen der Kondensationskerne und vor allem der Sublimationskerne durchgeführt worden sind, aus denen sich die angenommenen Unterschiede zwischen dem Kerngehalt der Seeluft und der Landschaft ergeben müßten. Diese Untersuchungen, für die bereits in den Jahren 1939 und 1940 eine geeignete Apparatur entwickelt wurde, können verständlicherweise erst in späterer Zeit durchgeführt werden. Die gewohnte Art der „Kernzählung“ mit den bekannten Kernzählern nach Aitken oder Scholz kann die Fragestellung nicht ihrer Lösung näherbringen, weil dabei nur summarisch eine Kernzahl bestimmt wird, die normalerweise nicht für die atmosphärische Kondensationsvorgänge in Betracht kommt.

Im folgenden soll eine zweite Erklärungsweise für die Unterschiede der charakteristischen Temperaturen zwischen Land- und Seegebieten angegeben werden, die auf ganz anderen Gedankengängen aufbaut.

Bei der Eisteilchenbildung in der Atmosphäre spielt die Zeit bestimmt eine sehr wesentliche Rolle. Verf. hat aus diesem Grunde bereits im Jahre 1938 die Apparatur, mit der erstmals die künstliche Herstellung von suspendierten Eisteilchen im Laboratorium gelang, so bemessen, daß der Entwicklungsgang der künstlichen Wolken in seiner Zeitdauer angenähert den atmosphärischen Verhältnissen angepaßt war. Auf diese Weise wurden damals auch auf Anhieb im Laboratorium ähnliche charakteristische Temperaturen für die Eisteilchenbildung gefunden wie in der Atmosphäre. Bei den Versuchen jedoch, über die Regener<sup>3)</sup> im Jahre 1941 berichtet, ergaben sich sehr viel tiefere charakteristische Temperaturen (etwa minus 50° C!), weil bei diesen Versuchen mit sehr schnellen Expansionsvorgängen gearbeitet wurde, die man nicht mit den atmosphärischen Vorgängen vergleichen darf. Der theoretische Nachweis für die Verschiedenheit der Ergebnisse dieser beiden Experimentaluntersuchungen,

die den Meteorologen wohl schon gefühlsmäßig verständlich ist, kann aus den Arbeiten von Volmer<sup>1)</sup> und Krastanow<sup>2)</sup> entnommen werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Eisteilchenbildung wächst danach mit der Zeit, während der die Vorbedingungen für die Eisteilchenbildung bestehen. Je länger die Vorbedingungen anhalten, um so mehr Eisteilchen können gebildet werden. Deshalb können auch bei verhältnismäßig ungünstigen Bedingungen, die innerhalb kurzer Zeiträume nur eine zahlenmäßig ganz unbedeutende und kaum merkliche Eisteilchenbildung ermöglichen würden, dennoch allmählich viele Eisteilchen entstehen, sofern diese Vorbedingungen genügend lange Zeit hindurch andauern. Daraus folgt, daß die verhältnismäßig kurzlebigen Quellwolken im allgemeinen erst von erheblich tieferen Temperaturen ab einen merklichen Gehalt von Eisteilchen zeigen können als die Schichtwolken. Tatsächlich hat Verf. das schon bei früheren Beobachtungen über Land bestätigt gefunden. Der Unterschied der charakteristischen Temperaturen ist danach von der Größenordnung 10° C.

Der besprochene Unterschied zwischen den charakteristischen Temperaturen bei den Quellwolken über Landgebieten einerseits und Seegebieten andererseits ist nun wahrscheinlich zumindest teilweise auch auf die verschiedene Ablaufgeschwindigkeit der Wolkenbildungsvorgänge zurückzuführen. Hierbei sind die verschiedenen thermodynamischen Verhältnisse über Land und See von ursächlicher Bedeutung.

Abgesehen von den Gegebenheiten an Luftmassengrenzen kommen über den Seegebieten nur geringere aerologisch wirksame Temperaturunterschiede vor als über Land. Die horizontalen Temperaturunterschiede sind auf der Wasseroberfläche gering, und eine Überhitzung der bodennahen Luftschicht infolge von Einstrahlung kommt nicht in Frage; eine ausgeprägte instabile Schichtung stellt sich nur bei ablandigem Wind und relativ warmer Wasseroberfläche ein. Bei den im Vergleich zu den Verhältnissen über Land geringen Temperaturgradienten können die Vertikalbewegungen nur mit verhältnismäßig geringeren Geschwindigkeiten erfolgen. Die Quellwolken entwickeln sich also über See im allgemeinen langsamer als über Land; die Wolkenluft strömt verhältnismäßig langsam empor und sinkt später verhältnismäßig langsam wieder ab. Die Verweilzeit des einzelnen Raumelements einer Quellwolke in der Nähe der Kulminationshöhe ist über See infolgedessen größer als über Land. Damit ist aber dann auch die Wahrscheinlichkeit für die Bildung einer merklichen Zahl von Eisteilchen unter sonst gleichen Bedingungen über See größer.

Weitere Beobachtungen und Untersuchungen müssen entscheiden, welcher der beiden hier genannten Erklärungsweisen der Vorzug zu geben ist. Diese Entscheidung ist nicht nur für das Verständnis und die Beurteilung der Wolken- und Niederschlagserscheinungen über See wichtig, sondern ihr kommt eine grundlegende Bedeutung für die Wolkenforschung zu. Die Entscheidung ist richtungweisend für die Weiterarbeit an dem großen Problem der technischen Wetterbeeinflussung.

#### IV. Flugmeteorologische Schlussbemerkungen

Sowohl die erleichterten Bedingungen für die Bildung von Sprühregen in Form der Nieselschauer als auch die erleichterten Bedingungen für die Eisteilchenbildung und damit für die Regenbildung bedeuten in

<sup>1)</sup> Vortrag vor dem Berliner Zweigverein der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, April 1939

<sup>2)</sup> L. Krastanow, Meteor. Z. 57, 357 (1940)

<sup>3)</sup> E. Regener, Veröffentlichungen der Deutschen Akademie für Luftfahrtforschung 1941

<sup>1)</sup> M. Volmer, Kinetik der Phasenbildung, Chem. Reaktion, Bd. IV, Dresden und Leipzig, 1939

<sup>2)</sup> L. Krastanow, Meteor. Z. 58, 37 (1941)

gleichem Sinne eine erhöhte Niederschlagsneigung der Wolken über Seegebieten. Bereits Wolkendecken von verhältnismäßig geringer Mächtigkeit können über Seegebieten Niederschlag liefern, und wenig mächtige Quellwolken verursachen bereits echte Regenschauer. Zwar entsteht auch über Landgebieten gelegentlich schon bei geringer Wolkenmächtigkeit Niederschlag, z. B. bei winterlichen Schauern, aber im allgemeinen sind dort zur Niederschlagsbildung erheblich größere Wolkenmächtigkeiten erforderlich. Die Niederschlag liefernden Wolken müssen bis in die Zone der für die Eisteilchenbildung charakteristischen Temperaturen hineinreichen und daher aus den besprochenen Gründen über Land mächtiger sein als über See.

Das ist für die Beurteilung des Flugwetters in Niederschlagsgebieten über See wichtig. Das Überfliegen von Niederschlagsgebieten, das über Land je nach den jahreszeitlichen Temperaturverhältnissen gelegentlich schwierig ist, bereitet bei der niedrigeren Niederschlagsbewölkung über Seegebieten nur wesentlich geringere Schwierigkeiten. Die Obergrenze der niedrigsten Quellwolken (auch Stratocumulusdecken), die echte Regenschauer liefern, liegt über See um die Größenordnung 1000 m niedriger als über Land. Die tiefe Lage

der nicht an Luftmassengrenzen gebundenen Niesel-schauerbewölkung ist ohnehin klar.

Auch hinsichtlich der Vereisungsverhältnisse ergeben sich infolge der besprochenen Erscheinungen über See beachtenswerte Unterschiede im Vergleich zu den Verhältnissen über Land. Da die Eisteilchenbildung über See leichter erfolgt als über Land, können sich die unterkühlten Wasserwolken über See schon bei verhältnismäßig hohen Temperaturen zu Eiswolken umbilden, und daher ist die Häufigkeit der unterkühlten Wasserwolken über See beträchtlich geringer als über Land. Die Wahrscheinlichkeit für die Vereisung von Flugzeugen ist daher schon allgemein über See verhältnismäßig gering. Im gleichen Sinne wirkt sich die Tatsache aus, daß über See Wolken mit hohen Vertikalgeschwindigkeiten, in denen lange unterkühltes Wasser erhalten bleibt, selten sind, ferner die Tatsache, daß es über See keine Hindernisbewölkung (z. B. Staubbewölkung) gibt, die über Land oftmals große Vereisungsgefahr bedeutet. Schließlich ist auch bei der Frage der Vereisungsgefahr in der Praxis die geringere Mächtigkeit der vereisungsgefährlichen Wolken über See zu beachten, die ein Überfliegen leichter ermöglicht als über Land.

## Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes

Herausgegeben vom Reichsamt für Wetterdienst

Reihe A, Nr. 11, Berlin 1941

(Nachdruck)

# Temperatur- und Feuchtemessung bei hohen Fluggeschwindigkeiten

Von W. Findeisen, Prag

Die Temperaturerhöhung, die an schnell bewegten Thermometern infolge von Reibungs- und Kompressionserwärmung der Luft eintritt, wurde bereits früher besprochen<sup>1)</sup>. Inzwischen wurde von Schulze<sup>2)</sup> und besonders eingehend von Eckert<sup>3)</sup> über Experimentaluntersuchungen berichtet. Deren Ergebnisse ermöglichen es jetzt, die Korrekturen, die bei Messungen der Lufttemperatur bei hohen Fluggeschwindigkeiten anzubringen sind, genauer und sicherer anzugeben, als das früher allein auf Grund der Theorie geschehen konnte. Das soll hier auseinandergesetzt werden und im Anschluß daran sollen die Fehler besprochen werden, die bei der Feuchtemessung von schnellen Flugzeugen aus auftreten.

## I. Temperaturmessung

Durch die Experimentaluntersuchung von Eckert ist mit großer Genauigkeit der Nachweis der Kompressionserwärmung im Staupunkt und der Reibungserwärmung an der tangential angeströmten Oberfläche erbracht worden. Dabei wurden die theoretisch vorausgesagten Werte voll bestätigt. Die Erwärmung im Staupunkt ist genau gleich der adiabatischen

Erwärmung bei der Druckzunahme, die beim Anstauen der Luft an der Vorderseite eines bewegten Körpers eintritt. Die Reibungserwärmung entspricht genau der Pohlhausenschen Formel. Der kleine Unterschied zwischen Kompressionserwärmung und Reibungserwärmung, an dessen Realität bisher gezweifelt werden konnte, besteht danach tatsächlich. Die Reibungserwärmung beträgt 85 % der Kompressionserwärmung; dem von mir früher berechneten Wert von 13 % für den Unterschied lagen noch nicht die Ergebnisse der neuesten Stoffwertbestimmungen zugrunde.

Die Eckertschen Untersuchungen zeigen, daß die Angaben der Thermometer von der Form der Thermometerkörper abhängen. Es gibt eigentlich nur zwei Wege für die exakte thermometrische Temperaturmessung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, nämlich die Messung der Staupunkttemperatur im Staupunkt eines Körpers oder die Messung der Reibungstemperatur an einer tangential angeströmten dünnen Platte. Beide Male kann die wahre Lufttemperatur sicher aus der Thermometertemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit errechnet werden. Für das Staupunktthermometer ist theoretisch der volle Betrag der Kompressionserwärmung anzunehmen (bei praktisch verwendbaren Geräten etwa 97—99 %), für das Platten-thermometer hingegen 85 % davon. Bei anderen Thermometerkörperformen ist die Errechnung der wahren Lufttemperatur jedoch nicht auf einfache Weise mög-

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Ann. Hydr. 66, 571 (1938); s. auch E. Frankenberger, Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 22, 99 (1934).

<sup>2)</sup> W. Schulze, Ann. Hydr. 68, 132 (1940).

<sup>3)</sup> E. Eckert, Zschr. d. Vereins deutscher Ing. 84, 813 (1940).

lich, weil bei ihnen der Prozentsatz des Erwärmungsbetrages wiederum von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Der Prozentsatz ist bei nichtwindschnittigen Körpern geringer als bei der tangential angeströmten Platte und beträgt z. B. bei einem quer angeströmten Zylinder von 1 mm Durchmesser bei der Geschwindigkeit 400 km/h etwa 70% <sup>1)</sup>, bei 600 km/h nur etwa 60%. — Übrigens kann sich auch beim Plattenthermometer der Erwärmungs-Prozentsatz verändern, nämlich dann, wenn die Grenzschicht vom laminaren in den turbulenten Strömungszustand übergeht. Der Unterschied beträgt aber nur höchstens 3%.

Die aerologischen Temperaturmessungen von schnellen Flugzeugen aus werden normalerweise mit Thermometern durchgeführt, deren Meßkörper dem Plattenthermometer ähnlich sind. Die Meteorographen enthalten ringförmige oder zungenförmige Bimetalle, die im wesentlichen tangential angeströmt werden.

Bei den zungenförmigen Bimetallen besteht allerdings die Möglichkeit, daß sie teilweise schräg zur Stauungsrichtung stehen. Bei solcher Schrägstellung löst sich die Strömung an der Leeseite des Bimetalls ab, so daß dort die Reibungserwärmung erheblich und in unkontrollierbarer Weise verringert wird; eine genaue Bestimmung der wahren Lufttemperatur wird damit unmöglich. Dieser Effekt ist aber in der Praxis nur von geringer Bedeutung, weil schräggehende Bimetalle schon aus mechanischen Gründen bei hohen Fluggeschwindigkeiten unbrauchbar sind, denn sie zeigen merkliche Verbiegungen infolge der Druckwirkungen des Luftstromes.

Durch Vorrichtungen am Meteorographen, die zur Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit in dem Schutzrohr dienen sollen, in dem der Thermometerkörper untergebracht ist (Blenden), wird die Temperaturmessung unsicher gemacht. Das ist besonders dann der Fall, wenn sich die Blenden in Luv des Thermometerkörpers befinden, denn dadurch wird im Thermometerraum eine unbekannte Druckverminderung hervorgerufen, die eine unkontrollierbare adiabatische Temperaturerniedrigung zur Folge hat. Wenn die Blenden in Lee des Thermometerkörpers angebracht sind, tritt eine Druckerhöhung im Thermometerraum ein und die Temperatur des Thermometerkörpers kann bei weitgehender Drosselung des Luftstroms schließlich bis zur Staupunkttemperatur erhöht werden. Die Angaben des Thermometers sind dann zwar wieder zweifelsfrei, aber eine solche Anordnung ist normalerweise nicht zweckmäßig, weil die Trägheit des Thermometers bei der geringen Belüftung groß wird.

Bei der Temperaturmessung von schnellen Flugzeugen aus ist zu beachten, daß besonders in der Umgebung der Tragflächen infolge der dort herrschenden Druckstörungen adiabatische Temperaturveränderungen gegeben sind. Diese Temperaturveränderungen können sich allerdings bei der Temperaturmessung nicht in vollem Maße auswirken, weil in den Gebieten erhöhten Druckes verminderte Geschwindigkeit, mithin verminderte Reibungserwärmung herrscht, und umgekehrt. In der Nähe der Profilnasen und auf der Unterseite der Tragflächen ist auf diese Weise eine weitgehende Kompensation der Temperaturstörung zu erwarten. Es muß aber damit gerechnet werden, daß in den Gebieten verminderten Druckes, z. B. oberhalb der Tragflächen, keine vollständige Kompensation der adiabatischen Temperaturerniedrigung erfolgt, daß also ein dort angebrachtes Thermometer stets eine verhältnismäßig zu tiefe Temperatur anzeigt, um so mehr, je höher die Fluggeschwindigkeit ist. Hierauf ist es vielleicht zurückzuführen, daß

Schulze (l. c.) bei seinen experimentellen Untersuchungen bei Flügen einen zu kleinen Betrag für die Reibungserwärmung beobachtet hat, nämlich nur rund 80 % der Kompressionserwärmung. —

Bei Thermometerkörpern, die im unbeeinflussten Luftstrom stehen und als tangential angeströmte, dünne Platten angesehen werden können, gilt nach Eckert für die Temperaturerhöhung durch Reibung.

$$\Delta \delta = \Delta \delta_{\text{Stau}} \cdot 0,85 \text{ [grad].}$$

Dabei ist, wie früher auseinandergesetzt wurde<sup>1)</sup>,

$$\Delta \delta_{\text{Stau}} = 3,87 \cdot 10^{-5} \cdot u^2,$$

wenn u die Fluggeschwindigkeit in Stundenkilometern ist, und es ergibt sich also

$$\Delta \delta = \frac{1}{3} \left( \frac{u}{100} \right)^2$$

Der Formel entsprechen die Zahlenwerte:

u	100	200	300	400	500	600 km/h
$\Delta \delta$	0,3	1,3	3,0	5,3	8,3	12,0° C.

Um diese Beträge ist die gemessene Temperatur zu vermindern, wenn die wahre Lufttemperatur bestimmt werden soll.

Die Werte gelten für den Flug außerhalb von Wolken. Beim Flug in Wasserwolken oder im Regen ist zu beachten, daß bei der Erwärmung des Thermometerkörpers und der Luft, die den Thermometerkörper umspült, zumindest ein Teil des flüssigen Wassers verdampfen kann, das zunächst in Form von Tropfen und dann, nach dem Auftreffen der Tropfen auf den Thermometerkörper, in Form einer Wasserhaut vorhanden ist. Die Wolkentropfen und besonders die Regentropfen können allerdings in der kurzen Zeit, in der sie die erwärmte Grenzschicht am Thermometerkörper durchmessen, nur zum verschwindend geringen Teil verdampfen; das geht aus Studien über die Verdampfungsgeschwindigkeit der Tropfen hervor<sup>2)</sup>. Der Luft, die in die Grenzschicht des Thermometerkörpers eintritt, wird also zunächst keine Verdampfungswärme entzogen und sie erwärmt sich deshalb trotz des Vorhandenseins der Tropfen anfangs um die oben angegebenen Temperaturbeträge. Hingegen erwärmt sich der Thermometerkörper nur in geringerem Maße, wenn er durch auftreffende Tropfen benetzt wurde. Er wirkt dann nämlich wie ein feuchtes Thermometer innerhalb der warmen, nicht wasserdampfgesättigten Grenzschicht.

Die Temperatur eines solchen feuchten Thermometers kann unschwer bestimmt werden. Sie ergibt sich genügend genau auf Grund der Überlegungen von Robitzsch<sup>3)</sup> aus der Feuchtadiabate und ist gleich derjenigen Temperatur, die anströmende Luft annähme, wenn in ihr während des Erwärmungsvorganges ständig bis zur Sättigung Tropfenwasser verdampft würde. Für die Temperatur des benetzten Thermometers ist es also gleichgültig, ob die bei der Erwärmung der Luft mögliche Verdampfung von Wasser schon von den Tropfen oder erst von der Thermometeroberfläche aus erfolgt.

Die Erwärmung, die ein vollständig benetztes Thermometer erfährt, kann im Anschluß an die oben für trockene Thermometer angegebene Formel aufgefaßt werden als

$$\Delta \delta = \frac{1}{3} \left( \frac{u}{100} \right)^2 \cdot f(\delta, p),$$

wobei der Faktor  $f(\delta, p) < 1$  ist und von der Temperatur und vom Luftdruck abhängt. Der Faktor  $f(\delta, p)$  stellt das Verhältnis zwischen feucht-adiabatischer und

<sup>1)</sup> Ann. Hydr. 66, 571 (1938).

<sup>2)</sup> Meteor. Z. 56, 453 (1939).

<sup>3)</sup> M. Robitzsch, Meteor. Z. 55, 428 (1938).

<sup>1)</sup> Vgl. Ann. Hydr. 66, 573 (1938), 3. Absatz, Zeile 14.

trocken-adiabatischer Temperaturzunahme bei bestimmter Druckzunahme dar und ist zufällig genau zahlengleich mit dem feuchtadiabatischen Temperaturgradienten, ausgedrückt in grad/100 dyn m; denn der trocken-adiabatische Temperaturgradient ist bekanntlich recht genau = 1. Die Werte für  $f(\delta, p)$  können also unmittelbar aus Tabellen für den feuchtadiabatischen Temperaturgradienten<sup>1)</sup> entnommen werden. In dem hier interessierenden Bereich (Temperaturen unter 0° C kommen nicht in Betracht) gelten folgende Zahlenwerte:

Druck mb	Temperatur °C					
	0	+5	10	15	20	25
1000	0,66	0,60	0,54	0,49	0,44	0,40
800	0,62	0,55	0,50	0,45	0,40	—
600	0,55	0,50	0,44	0,40	—	—

Bei genaueren Temperaturmessungen, vor allem bei besonders hohen Fluggeschwindigkeiten, ist zu beachten, daß die Temperatur, die für die Bestimmung von  $f(\delta, p)$  zugrunde gelegt wird, der Mittelwert zwischen wahrer und angezeigter Lufttemperatur sein muß.

Die Temperaturerhöhung des benetzten Thermometers kann auch mit Hilfe eines Adiabatenblattes bestimmt werden. Ausgehend von den wahren Zustandsgrößen der Luft wird für die jeweilige trockenadiabatische Temperaturerhöhung die entsprechende feuchtadiabatische Temperaturerhöhung für die gleiche Druckerhöhung aufgesucht. Umgekehrt liefert das Verfahren die wahre Lufttemperatur aus der Temperatur des benetzten Thermometers.

Wenn der Thermometerkörper eine Temperatur hat, die unter dem Gefrierpunkt liegt, so wird er beim Wolkenflug nicht mehr benetzt. Das Tropfenwasser erstarrt kurz nach dem Auftreffen zu Eis. An den der Stromrichtung zugekehrten Kanten des Thermometerkörpers bilden sich Eiswülste. Die dahinterliegende Oberfläche wird hingegen kaum beeinflusst. In diesem Falle kann also keineswegs mit der Korrekturformel gerechnet werden, die für ein benetztes Thermometer gilt. Bei einem plattenförmigen Thermometerkörper ist eher die Formel für die trockene Thermometeroberfläche anzuwenden, aber dabei ist zweierlei zu bedenken: 1. wird beim Vereisungsvorgang an den Stirnkanten des Thermometerkörpers die Gefrierwärme des Wassers frei und dort tritt je nach der Dichte der Wolken und der jeweiligen Temperatur eine Erwärmung ein, die weit über die Reibungserwärmung hinausgehen kann, 2. erfährt bei starkem Eiswulst an der Stirnkante des Thermometerkörpers der dahinterliegende Teil eine Temperaturerniedrigung infolge der Druckverminderung in Lee des Eiswulstes, so daß der Betrag der Reibungserwärmung dort bei weitem nicht erreicht wird. Die beiden Effekte, die in entgegengesetztem Sinn wirken, können nicht leicht abgeschätzt werden und es ergibt sich daraus grundsätzlich eine Unsicherheit der Temperaturmessung beim Flug in unterkühlten Wasserwolken. Ganz besonders groß ist die Unsicherheit natürlich bei der Verwendung mechanisch anzeigender Thermometer (Bimetallthermometer), bei denen infolge des Eisbelages die Richtkraft der Thermometer vermindert wird und bei denen infolge des Eisansatzes an den Hebellagern der Übertragungsmechanismus blockiert werden kann.

Eine gewisse Unsicherheit haftet aber den meisten Temperaturmessungen bei Wolkenflügen oder bei Flügen im Regen an, weil meist nicht bekannt ist, ob das Thermometer vollständig oder nur teilweise benetzt ist. Die Benetzung hängt von der Dichte der Wolken oder

des Regens, von der Tropfengröße, von der Fluggeschwindigkeit und von der Form des Thermometerkörpers ab. Für die gebräuchlichen Thermometerformen kann der Grad der Benetzung in den verschiedenen Wolkenarten und bei verschiedenen Fluggeschwindigkeiten nicht vorausgesagt werden. Zur Klärung dieser Frage sind weitere Untersuchungen nötig, über deren Ergebnisse später berichtet werden wird.

Beim Flug in Eiswolken, die nur Eisteilchen enthalten, findet natürlich keine Benetzung der Thermometerkörper statt.

## II. Feuchtemessung

Auch bei der Messung der relativen Feuchte von schnellen Flugzeugen aus weichen die Angaben der Meßgeräte grundsätzlich von den tatsächlich in der Luft herrschenden Werten ab. Die im vorigen Abschnitt besprochene Erwärmung, der die Thermometerkörper im schnellen Luftstrom unterliegen, macht sich auch an den Meßkörpern der Feuchtemeßgeräte bemerkbar und erzeugt dort eine Verringerung der relativen Feuchte.

Auf die Hygrometerhaare, bei denen es sich ja stets um dünne, tangential angeströmte Körper handelt, wirkt der volle Betrag der Reibungserwärmung, also

$$\Delta \delta = \frac{1}{3} \left( \frac{u}{100} \right)^2,$$

wenn  $u$  in km/h gemessen wird. Die Verringerung der relativen Feuchte, die mit dieser Temperaturerhöhung verbunden ist, läßt sich nicht einfach als Funktion der Fluggeschwindigkeit darstellen, denn sie hängt zugleich von den wahren Werten der Temperatur und Feuchte in der Luft ab und ist vor allem mit der Funktion Sättigungsdampfdruck — Temperatur verknüpft, die nur empirisch bekannt ist. Der Unterschied zwischen wahrer und angezeigter relativer Feuchte kann jedoch unschwer unter Zuhilfenahme des Dampfdrucks bestimmt werden. Der Dampfdruck bleibt bei dem Erwärmungsvorgang praktisch konstant. In einer Dampfdrucktabelle wird für die gemessene relative Feuchte und die gemessene Temperatur der Dampfdruck aufgesucht und dann für diesen Wert des Dampfdrucks bei der wahren Lufttemperatur die wahre relative Feuchte abgelesen.

Eine Übersicht über die Unterschiede, die zwischen wahrer und angezeigter Feuchte auftreten, gibt die folgende Tabelle. Sie kann als **Korrektionstabelle** bei der Ermittlung der wahren Feuchte dienen. Die Korrektionswerte sind zur angezeigten Feuchte hinzuzuzählen.

Aus der Tabelle geht hervor, daß der Unterschied zwischen wahrer und angezeigter relativer Feuchte bei hohen Fluggeschwindigkeiten sehr beträchtlich ist und deshalb nicht unbeachtet gelassen werden darf. Schon bei 300 km/h beträgt er bis zu 23 % relativer Feuchte.

Lufttemperatur + 20° C

Angezeigte rel. Feuchte %	Fluggeschwindigkeit in km/h				
	200	300	400	500	600
100	(8)	—	—	—	—
90	8	(18)	—	—	—
80	7	16	(30)	—	—
70	6	14	26	(45)	—
60	5	12	22	38	—
50	4	10	19	32	(52)
40	3	8	15	26	42
30	3	6	11	19	31
20	2	4	7	13	21
10	1	1	4	6	10
5	0	1	2	3	5

<sup>1)</sup> z. B. nach G. Stüve, s. F. Linke, Meteor. Taschenbuch I (1931).

Lufttemperatur  $\pm 0^\circ \text{C}$

Angezeigte rel. Feuchte %	Fluggeschwindigkeit in km/h				
	200	300	400	500	600
100	(10)	—	—	—	—
90	9	(21)	—	—	—
80	8	19	—	—	—
70	7	16	(31)	—	—
60	6	14	27	(47)	—
50	5	12	22	39	(64)
40	4	9	18	31	51
30	3	7	13	24	38
20	2	5	9	16	25
10	1	2	4	8	13
5	0	1	2	4	6

Lufttemperatur  $-20^\circ \text{C}$

Angezeigte rel. Feuchte %	Fluggeschwindigkeit in km/h				
	200	300	400	500	600
100	—	—	—	—	—
90	10	—	—	—	—
80	9	(23)	—	—	—
70	8	20	(39)	—	—
60	7	17	34	—	—
50	6	14	28	50	—
40	4	11	22	40	(68)
30	3	9	17	30	51
20	2	6	11	20	34
10	1	3	6	10	17
5	1	1	3	5	9

Zur Korrektur gemessener Feuchtwerte kann außer dieser Korrektortabelle auch ein etwas anderer Weg eingeschlagen werden, der gelegentlich von Vorteil ist. Die Differenz  $\Delta F$  zwischen der wahren relativen Feuchte  $F$  und der angezeigten relativen Feuchte  $F'$  wird hierzu aufgefaßt als

$$\Delta F = F' \cdot K$$

Wenn  $K$  der Korrekturfaktor ist, also

$$F = F' + \Delta F = F' (1 + K).$$

Für die Faktoren  $K$  gelten dann folgende Zahlenwerte:

Lufttemperatur	Fluggeschwindigkeit in km/h				
	200	300	400	500	600
+20	0,09	0,23	0,37	0,64	1,04
+0	0,10	0,23	0,45	0,79	1,27
-20	0,11	0,28	0,56	1,00	1,70

Näherungsweise kann  $K$  dargestellt werden als

$$K = 0,03 \cdot \left(\frac{u}{100}\right)^2$$

und als Korrekturformel für die relative Feuchte gilt daher

$$F = F' \left(1 + 0,03 \left(\frac{u}{100}\right)^2\right)$$

Die Formel stimmt bis etwa 500 km/h leidlich mit den hier für  $K$  bei  $\pm 0^\circ$  angegebenen Zahlenwerten überein und kann daher bis zu dieser Geschwindigkeit verwendet werden. Da bei der Messung der relativen Feuchte meist keine hohe Genauigkeit gefordert wird und mit den gebräuchlichen Haarhygrometern auch gar keine genaueren Messungen möglich sind, genügt die Korrekturformel für normale aerologische Messungen bei allen Temperaturen.

Bei der Auswertung von Feuchtereistrierungen kann die Korrektur auf sehr ein-

fache Weise graphisch angebracht werden. Die Eichkurve jedes Haarhygrometers stellt bekanntlich angenähert eine logarithmische Funktion dar. Andererseits zeigt die Korrekturformel, daß die Größe der Korrektur proportional mit der angezeigten Feuchte wächst. Aus diesen Gründen entspricht die Korrektur, die bei einer bestimmten Fluggeschwindigkeit angebracht werden muß, bei allen relativen Feuchten nahezu dem gleichen Zeigerausschlag. Die ganze Feuchtekurve eines Höhengaufstieges kann also angenähert einfach dadurch korrigiert werden, daß die Basislinie, von der aus der Ausschlag gemessen wird, um einen bestimmten Betrag verschoben wird. Dieser Betrag hängt von der Fluggeschwindigkeit ab und braucht nur für einen einzigen Punkt bestimmt zu werden, wenn sich die Fluggeschwindigkeit während des Aufstiegs nicht geändert hat. In der Praxis muß aber berücksichtigt werden, daß die Geschwindigkeit im untersten Teil des Aufstiegs meist besonders hoch ist. Die Temperaturabhängigkeit der Feuchtekorrektur bleibt bei diesem Verfahren einfachheitshalber unberücksichtigt. —

Bei der Feuchtemessung ist hinsichtlich der Anordnung der Hygrometerhaare im Meteorographen und hinsichtlich der Anordnung des Meßgeräts am Flugzeug im Grunde das Gleiche zu beachten, was schon oben bei der Temperaturmessung besprochen wurde, denn die Ursache der Feuchteabweichung ist ja die gleiche wie bei der Temperaturabweichung. In der meteorologischen Praxis spielen aber diese Feinheiten bei der an sich ungenauen Feuchtemessung kaum eine Rolle.

Für die Verhältnisse beim Flug in Wolken ist bei der Feuchtemessung noch mehr als bei der Temperaturmessung entscheidend, ob der Meßkörper benetzt wird oder nicht. Ein benetztes Feuchtemeßgerät müßte beim Wolkenflug nahezu Sättigung anzeigen. Die tangential angeströmten Hygrometerhaare werden aber beim Wolkenflug nicht unmittelbar von Tropfen getroffen. Wohl fließt von dem Halteblech, das die Haare zusammenhält, Wasser zu den Haaren hin, denn an diesem Blech findet bestimmt Tropfenaufschlag statt; auch von dem Hebel aus, der die Hygrometerhaare spannt, kann Tropfenwasser auf die Haare gelangen. Sofern die Haare nicht gerade so angeordnet sind, daß auch noch von anderen Gerätteilen her Wasser in größeren Mengen zu ihnen hinfließt, ist aber auf diese Weise keine vollständige Benetzung zu erwarten. Das Wasser fließt sicherlich nur in einigen Tropfen an den Haaren entlang und überdeckt dabei in jedem Augenblick nur einen kleinen Teil der Haaroberfläche, während der weitaus größte Teil der Haare trocken ist und sich auf die durch Reibungserwärmung verminderte Feuchte einstellt. Dabei ist noch zu bemerken, daß bei der geringen Ausdehnung der Wasseroberfläche nur eine unwesentlich kleine Menge Wasser in der erwärmten Grenzschicht verdampfen kann und durch diese Verdampfung keine beträchtliche Feuchteänderung hervorgerufen wird. Demnach ist also auch beim Wolkenflug zumindest angenähert mit der oben angegebenen Korrektur zu rechnen. Beim Flug in Eiswolken trifft das uneingeschränkt zu.

In Wasserwolken beträgt die relative Feuchte bekanntlich fast immer sehr genau 100%<sup>1)</sup> und die Feuchtemessung beim Wolkenflug liefert daher anschauliche Beispiele für den Unterschied zwischen wahrer und angezeigter Feuchte, obwohl gerade beim Wolkenflug wegen der möglichen Benetzung u. U. verhältnismäßig kleinere Unterschiede auftreten können als beim Flug außerhalb von Wolken. Tatsächlich kann man feststellen, daß entsprechend den oben angegebenen Korrekturwerten schon bei der Fluggeschwindigkeit 200 km/h während des Wolkenfluges nur etwa 90% relative Feuchte vom Hygrographen registriert werden.

<sup>1)</sup> Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 20, 157 (1933).

# Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes

Herausgegeben vom Reichsamt für Wetterdienst

Reihe A, Nr. 20, Berlin 1943

(Nachdruck)

## Experimenteller Nachweis der Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit

Von W. Findeisen und B. Walliser, Prag

Die früheren Mitteilungen über die Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit<sup>1) 2) 3)</sup>, nach denen schnelle Flugzeuge erst bei merklich tieferen Lufttemperaturen vereisen können als langsame Flugzeuge und insofern hinsichtlich der Vereisungshäufigkeit begünstigt sind, haben lebhaftes Erörterungen veranlaßt. Es haben sich mehrere Stimmen gefunden (merkwürdigerweise auch unter angesehenen Sachkennern), die eine Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit überhaupt verneinen oder jedenfalls die mitgeteilten Zahlenwerte abstreiten. Um die vorgebrachten Bedenken zu zerstreuen und nicht etwa eine fortschritthemmende Verwirrung im einschlägigen Schrifttum entstehen zu lassen, wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt. Ihre Ergebnisse liefern den Beweis dafür, daß die Überlegungen, die schon im Jahre 1938 zur Voraussage der genannten Abhängigkeit führten, richtig sind. Damit können die früher erörterten wichtigen Folgerungen, die sich für die Vereisungslehre aus dieser Abhängigkeit ergeben, als zweifelsfrei gesichert gelten.

### I. Einführung und Grundlagen

Die „Vereisungsgrenze“ legt diejenige Höhe fest, von der ab bei der herrschenden Temperaturverteilung die Vereisung von Flugzeugen möglich ist. Nach der Vereisungslehre liegt die Vereisungsgrenze stets oberhalb der meteorologischen „Nullgradgrenze“, um so mehr, je höher die Geschwindigkeit („wahre Eigengeschwindigkeit“) des betrachteten Flugzeuges ist. Der Höhenunterschied beruht auf der Temperaturerhöhung, die die Flugzeugteile infolge von Kompression und Reibung der anströmenden Luft erfahren. Sie bewirkt, daß das Flugzeug auch noch in einem gewissen, von der Fluggeschwindigkeit abhängigen Höhenbereich oberhalb der Nullgradgrenze eine Temperatur behält, die über dem Gefrierpunkt liegt; dabei ist eine Eisbildung physikalisch unmöglich.

Der Betrag der durch Kompression und Reibung verursachten Temperaturerhöhung ist für die Verhältnisse im wolkenfreien Raum auf Grund von Rechnungen<sup>4) 5) 6)</sup> und Laboratoriumsmessungen<sup>7)</sup> festgestellt wor-

den; er ist heute unumstritten und auch der Unterschied zwischen den Wärmewirkungen von Reibung und Kompression ist bekannt. Für die Vereisung sind jedoch die Verhältnisse im wolkengefüllten Raum maßgebend. Man kann leicht einsehen<sup>1) 2)</sup>, daß hier die Erwärmung geringer sein muß als im wolkenfreien Raum, weil bei der Verdunstung des Tropfenwassers, das beim Fluge auf die betrachteten Stirnkanten der Flugzeugteile auftritt, Wärme verlorengeht. Es ergibt sich, daß das Verhältnis zwischen den Temperaturerhöhungen im wolkengefüllten und im wolkenfreien Raum gerade zahlengleich mit dem bekannten Wert für den vertikalen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten, gemessen in grad/100 dynm, sein muß; in dem für die Vereisung in Betracht kommenden Höhen- und Temperaturbereich liegt der Zahlenwert zwischen 0,50 und 0,85.

Infolge des Unterschiedes der Temperaturerhöhungen beim Fluge innerhalb und außerhalb von Wolken muß ein Flugzeug, das horizontal aus dem wolkenfreien Raum in eine Wolke hineinfliegt, eine plötzliche Temperaturerniedrigung erfahren. Diese Tatsache ist für die Vereisungslehre besonders wichtig, denn sie bedeutet, daß ein Flugzeug, das vor dem Einflug in Wolken in einer Höhe gehalten wird, in der das Bordthermometer gerade 0° C oder sogar eine noch etwas höhere Temperatur anzeigt, nach dem Einflug in die Wolken dennoch vereisen kann. Um beim Einflug in vereisunggefährliche Wolken sicher die Vereisung zu vermeiden, muß deshalb eine Höhe aufgesucht werden, in der das Bordthermometer vor dem Einflug eine gewisse Temperatur über 0° C anzeigt. Diese sogenannte „Sicherheitstemperatur“ hängt wieder von der Fluggeschwindigkeit ab.

Bei ihrer Berechnung muß beachtet werden, daß die Kompressions- und Reibungserwärmung am Meßkörper des Bordthermometers in anderer Weise erfolgt als an den Stirnkanten der Flugzeugteile, die für die Vereisung in Betracht kommen. In der Nähe der Stirnkanten wird die Erwärmung fast ausschließlich durch die adiabatische Kompression der Luft verursacht, jedoch am Thermometerkörper, der vorwiegend tangential angeströmt wird, praktisch allein durch die Reibung. Wie die Untersuchungen in wolkenfreier Luft, die hierbei ohne Einschränkung angewendet werden dürfen, ergeben haben, beträgt die Reibungserwärmung 85% der Kompressionserwärmung. Der Meßkörper des Bordthermometers ist also stets kälter als die Stirnkanten. Die Sicherheitstemperatur ergibt sich als Differenz im wolkenfreien Raum und der Temperatur der Stirnkanten zwischen der Temperatur des Bordthermometers

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Jahrb. d. deutschen Luftfahrtforsch. 1938, Ergänzungsband, S. 102.

<sup>2)</sup> W. Peppler und W. Findeisen, „Vereisung bei hohen Fluggeschwindigkeiten“, herausgegeben vom Reichsamt für Wetterdienst, Berlin 1939.

<sup>3)</sup> D (Luft) 1209 „Vereisung“, 1940 und hierzu: W. Findeisen, Meteorologischer Kommentar zur D (Luft) 1209 „Vereisung“, Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes, Reihe A, Nr. 19, 1943.

<sup>4)</sup> E. Pohlhausen, Ztschr. f. angew. Math. u. Mech., 1, 121 (1921).

<sup>5)</sup> E. Frankenberger, Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 22, 99 (1934).

<sup>6)</sup> W. Findeisen, Ann. Hydr. 66, 571 (1938).

<sup>7)</sup> E. Eckert, Ztschr. d. Vereins deutscher Ing. 84, 813 (1940).

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Ann. Hydr. 66, 571 (1938).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Forschungs- u. Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes, Reihe A, Nr. 11, 1941.

im wolkenfreien Raum und der Temperatur der Stirnkanten im wolkenerfüllten Raum bei gleicher Lufttemperatur.

Für die Temperaturerhöhung durch Kompression und Reibung kann allgemein die Formel<sup>1) 2)</sup>

$$(1) \Delta \delta = 3,87 \cdot 10^{-5} \cdot u^2 \cdot k \cdot c \text{ [}^\circ\text{C]}$$

benutzt werden. in der  $u$  die Fluggeschwindigkeit in km/h,  $c$  den vertikalen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten in grad/100 dynm und  $k$  eine Formkonstante des betrachteten Körpers oder des betrachteten Oberflächenteiles bedeutet.  $c$  hängt vom Druck und von der Temperatur ab; für den wolkenfreien Raum ist jedoch stets  $c = 1$  zu setzen.  $k$  beträgt für die Stirnkanten = 1, an tangential angeströmten Oberflächen teilen = 0,85.

Die Sicherheitstemperatur ist dann

$$(2) \delta = 3,87 \cdot 10^{-5} \cdot u^2 \cdot (0,85 - c) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Die Werte  $c$  können aus Tabellen<sup>3)</sup> entnommen werden, und zwar genügt es hierbei, sie lediglich für die Temperatur  $0^\circ\text{C}$  aufzusuchen, so daß nur noch die Abhängigkeit vom Druck zu beachten ist:

$p$	10	0	900	800	700	600	500	mb
$c$	0,66	0,64	0,62	0,59	0,55	0,52	grad/100 dyn m.	

Werte unter  $c = 0,55$  grad/100 dyn m kommen praktisch normalerweise nicht in Betracht, da sie eine extrem hohe Lage der Nullgradgrenze voraussetzen. Für die D (Luft) 1209 wurde sicherheitshalber dieser niedrige Wert für  $c$  zugrunde gelegt, mit dem sich folgende abgerundeten Werte für die Sicherheitstemperatur  $\delta$  ergeben:

$u$	200	300	400	500	600	700	800	km/h
$\delta$	+1/2	0	1	2	3	4	5	6
	C							

Für die Berechnung des Höhenunterschiedes zwischen der Vereisungsgrenze und der Nullgradgrenze muß eine Annahme über den jeweils vorhandenen vertikalen Temperaturgradienten gemacht werden. Die vielen vorliegenden aerologischen Messungen lehren, daß der adiabatische Temperaturgradient, d. h. außerhalb von Wolken der trockenadiabatische, innerhalb von Wolken der feuchtadiabatische Temperaturgradient, nur selten überschritten wird und somit praktisch als Höchstwert gelten kann. Es liegt nahe, sicherheitshalber mit diesem Höchstwert zu rechnen. Für den Höhenunterschied ergibt sich mit

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta h} = c \text{ [grad/100 dyn m]} \text{ und } k = 1 \text{ aus Formel (1)}$$

$$(3) \Delta h = 3,87 \cdot 10^{-3} u^2 \text{ [dyn m]}$$

Dem entsprechen folgende Zahlenwerte:

$u$	200	300	400	500	600	700	800	km/h
$\Delta h$	150	350	600	1000	1400	1900	2500	m.

In der D (Luft) 1209 wurden kleinere Werte mitgeteilt, nämlich:

$\Delta h$	150	300	500	800	1200	1600	2100	m.
------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	----

Das geschah wiederum aus Sicherheitsgründen, um zwei Erscheinungen, die in ihrer Auswirkung früher, zur Zeit der Herausgabe der D (Luft) 1209, nur vorausgeahnt werden konnten, jedenfalls nicht ganz unberücksichtigt zu lassen.

Hierbei handelt es sich erstens um die Tatsache, daß der Vorgang der Vereisung nicht streng auf die Stirnkanten der Flugzeugteile beschränkt bleibt, sondern etwas breitere Zonen an den Luvseiten der Teile erfaßt; dort ist nicht durchweg mit  $k = 1$ , sondern schon mit einem etwas verringerten Wert zu rechnen. Zweitens handelt es sich um die Temperaturstörung, die durch das Auftreffen des Tropfenwassers auf die Flugzeugteile hervorgerufen wird. Da Wasser eine größere

spezifische Wärme hat als Luft, wird die Temperatur des Tropfenwassers bei der Umsetzung von kinetischer in thermische Energie weniger stark erhöht als diejenige der Luft. Es verursacht deshalb beim Auftreffen auf die Flugzeugteile eine Temperaturerniedrigung, die merklich werden muß, wenn es sich um verhältnismäßig große Wassermengen handelt. Die beiden Erscheinungen, die für das Verständnis mancher Eigentümlichkeiten der Vereisung sehr wichtig sind, werden demnächst an anderer Stelle im allgemeinen Zusammenhang ausführlicher besprochen werden. Überschlagsrechnungen zeigten schon früher, daß ihnen für die hier besprochene Frage normalerweise keine entscheidende Bedeutung zukommen kann. Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen, bei denen ein Vergleich der theoretisch vorausgesagten Zahlenwerte mit der Wirklichkeit durchgeführt wurde, bestätigen auch dieses Rechenergebnis.

## II. Messungen bei Flügen

Die Messung des Höhenunterschiedes zwischen der Vereisungsgrenze und der Nullgradgrenze kann beim Fluge nicht unmittelbar, jedenfalls dann nicht in überzeugender Weise erfolgen. Die Schwierigkeiten liegen dabei nicht in der Feststellung der Vereisungsgrenze, sondern vielmehr in der überzeugend sicheren Feststellung der Nullgradgrenze vom Flugzeug aus. Dabei muß man nämlich die gleichen, obengenannten Formeln für die Berechnung der Temperaturerhöhung benutzen, die für die Berechnung der Vereisungsgrenze zugrunde gelegt wurden und deren Gültigkeit ja gerade bewiesen werden soll. Es ist zwar möglich, zur gleichen Zeit, in der die Höhe der Vereisungsgrenze vom Flugzeug aus bestimmt wird, vom Boden aus mit Hilfe einer nicht an ein Flugzeug gebundenen aerologischen Meßmethode die Höhe der Nullgradgrenze zu bestimmen. Derartige Messungen würden aber wegen der fast stets vorhandenen, sehr beachtlichen Temperaturschwadigkeit der Luft keine genauen Rückschlüsse zulassen, solange sie nicht in größerer Zahl, also mit unverhältnismäßig großem Aufwand durchgeführt werden.

Leicht möglich ist hingegen die Kontrolle der Sicherheitstemperatur. Diese Kontrolle stellt zugleich eine mittelbare Nachprüfung der Rechnungsergebnisse für die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Vereisungsgrenze dar, da die Vereisungsgrenze ja mit dem gleichen Rechnungsansatz bestimmt wird wie die Sicherheitstemperatur.

Für die Kontrolle der Sicherheitstemperatur werden zweckmäßig zunächst Wolken ausgewählt, die in gutem Temperaturgleichgewicht mit der umgebenden Luft stehen. Bei Quellwolken trifft das nur in einem einzigen Niveau zu; über diesem Niveau sind die Quellwolken kälter, darunter hingegen wärmer als ihre Umgebung. Besser geeignet sind Schichtwolken, aber auch hier sind an den interessierenden Wolkenrändern wesentliche horizontale Temperaturunterschiede möglich. Günstige Verhältnisse liegen bei der Wolkenform *Alto cumulus cumulogenitus* (*Ac cug*) vor, die durch Ausbreitung von größeren Quellwolken, meist *Cumulonimben*, in einem bestimmten, geeigneten Niveau gebildet werden und dort ohne weitere Vertikalbewegung und unabhängig von der Lebensgeschichte der Quellwolke bestehen bleiben. Diese Form hat außerdem den Vorteil, einen wesentlich größeren Wassergehalt und auch schärfere Begrenzungen zu besitzen als eine normale Schichtwolke von gleicher Mächtigkeit, so daß die Erscheinungen der Temperaturerniedrigung und gegebenenfalls der Vereisung beim Einflug in die Wolke besonders augenfällig erfolgen müssen. Leider ist der *Ac cug* keine häufige

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Ann. Hydr. 66, 571 (1938).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Forschungs- u. Erfahrungsberichte, Reihe A, Nr. 11 (1941).

<sup>3)</sup> Z. B. Meteor. Taschenb., herausgegeben v. F. Linke.

Erscheinung, wenn man die Bedingung stellen muß, daß er gerade in der Höhe der Vereisungsgrenze auftritt, wie es für die Kontrolle der Sicherheitstemperatur erforderlich ist.

Immerhin gelang es, mehrere horizontale Einflüge in Ac cug durchzuführen, wobei stets genau diejenige Höhe eingehalten wurde, in der ein gut geeichtes Bordthermometer gerade die der Geschwindigkeit entsprechende Sicherheitstemperatur anzeigte, so daß sich das Flugzeug also gerade in der Höhe der Vereisungsgrenze befinden müßte; dabei wurden die Zahlenwerte der D (Luft) 1209 zugrunde gelegt. Bei diesen Einflügen und ebenso auch bei Einflügen in andere Wolkenformen trat in keinem Falle Vereisung ein, obwohl es sich durchweg um Wasserwolken handelte, die bekanntlich unter geeigneten Temperaturverhältnissen unbedingt Vereisung hervorrufen. Unter den Versuchsergebnissen muß hervorgehoben werden, daß auch Einflüge in kleine Quellwolken in der Höhe der Sicherheitstemperatur keine Vereisung zur Folge hatten, obwohl hierbei bestimmt die Lufttemperatur in der Wolke tiefer war als in ihrer Umgebung. In gleicher Richtung liegt das Beobachtungsergebnis, daß bei geringer Unterschreitung der Sicherheitstemperatur (also Überschreitung der Vereisungsgrenze) noch keine Vereisung eintrat, sondern erst bei Unterschreitungen von mehr als etwa  $1^{\circ}\text{C}$ . Dieses Beobachtungsergebnis steht im Einklang mit den theoretischen Grundlagen, denn bei den zugrunde gelegten Zahlenwerten der D (Luft) 1209 wurde ja sicherheitshalber ein Abzug angebracht.

Außer dieser halbquantitativen Nachprüfung der Sicherheitstemperatur wurden Messungen auf vollständig quantitativer Grundlage durchgeführt. Es wurde bei Lufttemperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  die Temperaturerniedrigung festgestellt, die ein Bordthermometer beim Einflug in Ac cug erfährt. Für das verwendete Bordthermometer, dessen Meßkörper die Form einer ebenen, in der Strömungsrichtung stehenden Platte hatte, wurde  $k=0,83$  auf Grund von 34 Messungen bestimmt. Die Ablesegenauigkeit des elektrischen Anzeigerates betrug  $0,01^{\circ}\text{C}$ . 16 Messungen bei Einflügen in Wolken in Höhen zwischen 2000 und 3500 m mit Fluggeschwindigkeiten zwischen 260 und 320 km/h lieferten Werte für die Temperaturerniedrigung, die sich von den auf Grund von Formel (1) berechneten Werten im Mittel nur um  $0,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  unterschieden. Die Meßeffekte betragen dabei 0,9 bis  $1,4^{\circ}$ , konnten also zweifelsfrei festgestellt werden. Ferner wurde bei Einflügen in Wolken die Temperaturdifferenz zwischen einem tangential angeströmten Plattenthermometer und einem Thermometer, das auf die Stirnkante einer Tragfläche aufgelegt war, gemessen. Auch hierbei zeigte sich durchschnittlich keine Abweichung von den Werten, die sich auf Grund der Formel (1) berechnen lassen. Die mittlere Abweichung betrug bei 9 Messungen nur  $0,0 \pm 0,15^{\circ}\text{C}$ .

Alle diese bei Flügen durchgeführten Untersuchungen bestätigen also die früheren theoretischen Aussagen.

### III. Messungen am Boden

Trotz der eindeutigen Ergebnisse der in Abschnitt II beschriebenen Untersuchungen erschien es notwendig, ergänzende Untersuchungen mit laboratoriumsmäßigen Hilfsmitteln am Boden durchzuführen. Gegenüber den Untersuchungen bei Flügen haben die Untersuchungen am Boden den Vorteil, daß sie sich stets leicht reproduzieren und nachprüfen lassen. Bei Untersuchungen am Boden fallen vor allem die Schwierigkeiten fort, die im Fluge der genauen Bestimmung der wahren Lufttemperatur entgegenstehen. Andererseits muß

darauf hingewiesen werden, daß die Verhältnisse, die bei der Flugzeugvereisung in den natürlichen Wolken gegeben sind, bei Versuchen am Boden immer nur unvollkommen nachgeahmt werden können; die Ergebnisse derartiger Versuche dürfen daher grundsätzlich nur vorsichtig gewertet werden.

Das Ziel der Untersuchungen am Boden war, bei vorgegebenen Lufttemperaturen jeweils diejenigen Geschwindigkeiten festzustellen, bei denen gerade die Grenze der Vereisung erreicht wird. Auf diese Weise mußte sich ergeben, ob der obengenannte Rechnungsansatz für die Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit richtig ist oder nicht.

Eine Holzlatte von 2 m Länge ist mit ihrer Mitte an der Achse eines Elektromotors befestigt und wird auf diese Weise nach Art einer Luftschraube in Rotation versetzt. Die Latte besitzt einen stromlinienförmigen Querschnitt. Die Nennleistung des Elektromotors beträgt 2 PS, die Drehzahl 1400 U/min. Durch die Rotation werden an der Latte in radial steigendem Maße Geschwindigkeiten erzeugt, deren Größe sich für jeden Punkt der Latte aus dem Abstände vom Drehpunkt und aus der Drehzahl, die mit einem Tourenzähler gemessen wird, ausrechnen läßt. Sie betragen zwischen 0 und 520 km/h. Die Rechnung ist natürlich nur dann berechtigt, wenn die Luft, in der sich die Latte bewegt, nicht mitrotiert. Wie von Versuchen mit den früher bei der Eichung von Windmeßgeräten gebräuchlichen Rundläufen her bekannt ist, tritt das Mitrotieren sehr leicht ein, wenn sich die rotierende Anordnung in einem geschlossenen, nicht belüfteten Raume befindet. Es ist daher notwendig, die rotierende Latte in einem Luftstrom aufzustellen, so daß die Luft in der Rotationsebene ständig erneuert wird. Hierfür genügt der natürliche Wind.

Die rotierende Latte wird der Vereisung ausgesetzt, indem sie in unterkühlten Wassernebel gebracht wird. In Ermangelung eines Kältewindkanals wird die Anordnung hierzu bei Winterwetter im Freien aufgestellt, wobei der Nebel durch Wasserzerstäubung künstlich erzeugt wird. Der Zerstäuber besteht aus 26 einzelnen, nebeneinander angeordneten Zerstäuberdüsen, von denen jede in bekannter Weise aus einem horizontal stehenden und einem senkrecht stehenden Röhrchen gebildet wird. Die senkrecht stehenden Röhrchen tauchen in eine wassergefüllte Blechwanne ein, während die anderen miteinander verbunden und an eine Preßluftanlage angeschlossen sind. Der Zerstäuber wird mit einem Luftdruck von 3 bis 4 atü betrieben; die zerstäubte Wassermenge beträgt dabei 0,4 l/min. Die Verteilung des Wassers in der Luft wird durch den sich verbreiternden Luftstrahl des Zerstäubers im Zusammenwirken mit dem natürlichen Wind besorgt. Die Anordnung wird stets so aufgestellt, daß sich der Zerstäuber luvwärts von der rotierenden Latte befindet, der Nebel also vom Wind an der Latte vorbeigeführt wird.

Der Zerstäubernebel ist wesentlich großtropfiger als die natürlichen Wasserwolken. Diese Tatsache ist aber bei den hier beschriebenen Untersuchungen bedeutungslos, ebenso wie die starke Inhomogenität des Zerstäubernebels und seine durch die Ungleichmäßigkeit des Windes hervorgerufene Schwadigkeit. Zu beachten ist jedoch, daß die Tropfentemperatur im Zerstäubernebel nicht den natürlichen Verhältnissen entspricht. Während in den natürlichen Wolken höchstens nur sehr geringfügige Temperaturunterschiede zwischen Tropfen und Luft auftreten<sup>1)</sup>, ist bei der Zerstäubung ein beträchtlicher Temperaturunterschied gegeben; denn das Wasser verläßt die Düsen mit einer Temperatur über  $0^{\circ}\text{C}$ , hingegen hat die Luft bei den Ver-

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Beiträge z. Phys. d. fr. Arm. 20, 157 (1933).

eisungsversuchen stets Temperaturen unter 0° C. Die Tropfentemperatur nähert sich allerdings rasch der Lufttemperatur. Hierbei spielt der Wärmeverlust der Tropfen infolge von Verdampfung eine entscheidende Rolle. Da die anströmende Luft bei den Versuchen normalerweise nicht wasserdampfgesättigt ist, nehmen die Tropfen schließlich sogar eine tiefere Temperatur an als die Luft. Auf Grund früher mitgeteilter Rechnungsansätze<sup>1)</sup> ergibt sich, daß dieser Fall bei der gegebenen Tropfengröße und den gegebenen Feuchtigkeitsverhältnissen nach etwa  $\frac{1}{20}$  sec eintreten muß, d. h. z. B. bei der Windgeschwindigkeit 4 m/sec in etwa 0,2 m Entfernung vom Zerstäuber. Bei den Versuchen wurde der Zerstäuber meist etwa 2 m entfernt von der rotierenden Latte aufgestellt, so daß die Tropfen an der Versuchsstelle also stets bereits kälter waren als die Luft.

Die Versuche werden zweckmäßig in der Weise durchgeführt, daß bei den jeweils gegebenen atmosphärischen Bedingungen und bei einer stets etwa gleich großen Drehzahl der rotierenden Latte festgestellt wird, bis zu welchem Achsenabstand die Eiswülste auf den beiden Hälften reichen. Durch die Eisgrenze auf der Latte wird derjenige Punkt markiert, in dem unter den herrschenden Verhältnissen die Temperatur 0° C erreicht wird.

Hierbei muß geprüft werden, ob nicht ein teilweises Abplatzen des Eises infolge der Zentrifugalkraft eingetreten ist, so wie dies bei den Luftschrauben der Flugzeuge meist zutrifft. Diese Erscheinung, die natürlich die Untersuchungsergebnisse vollständig fälschen würde, kann an der Beschaffenheit der Grenze der Eiswülste erkannt werden. Bei teilweisem Abplatzen ist eine scharfe Begrenzung der Eiswülste zu erwarten, deren Achsenabstand an den beiden Lattenteilen höchstens zufällig übereinstimmt. Wenn der Eisbelag hingegen infolge des radialen Temperaturgefälles begrenzt wird, so ist eine weniger scharfe, aber in einheitlichem Achsenabstand auftretende Grenze zu erwarten. Um das Abplatzen zu verhindern, ist das Holz der Latte in der Umgebung der Stirnkanten etwas aufgerauht und mit kleinen Einschnitten versehen worden. Es zeigte sich, daß nach dieser Vorsichtsmaßnahme kein Abplatzen eintrat.

Entsprechend der Theorie ergeben die Versuche, daß bei Temperaturen von einigen Grad unter Null stets nur an den zentralen Teilen der Latte Eiswülste auftreten, während die Lattenenden eisfrei bleiben. Die Lattenenden sind dabei naß, ein Zeichen dafür, daß zweifellos auch dort viele Tropfen des künstlichen Nebels auftreffen, aber infolge der erhöhten Temperatur der Lattenenden nicht gefrieren können. Die eisfreien Enden sind um so länger, je höher die Lufttemperatur ist. Bei genügend tiefer Temperatur vereist die Latte auf der ganzen Länge.

Für die quantitative Betrachtung der Erscheinung genügt es nicht, den Ort der Eisgrenze auf der Latte bei einer bestimmten Drehzahl einfach als Funktion der Lufttemperatur zu beachten, sondern es muß an Stelle der Lufttemperatur die „Feuchttemperatur“ zugrunde gelegt werden, d. h. die Temperatur des feuchten Thermometers eines Aspirationspsychrometers. Das ist nötig, weil bei den Versuchen normalerweise nicht wie beim Wolkenflug (in Wasserwolken) Wasserdampfgesättigung in der Luft herrscht. Bekanntlich nimmt jeder feuchte Körper eine tiefere Temperatur an als die Luft, nämlich die jeweils herrschende Feuchttemperatur, die nur bei Wasserdampfgesättigung mit der Lufttemperatur übereinstimmt. Das gilt auch für die durch Beaufschlagung befeuchtete Latte, solange sie sich in Ruhe befindet. Das Rotationszentrum,

die Nabe der Latte, behält stets die Feuchttemperatur. Hiervon ausgehend wirkt sich mit steigender Geschwindigkeit die Temperaturerhöhung durch Kompression und Reibung in steigendem Maße aus und erzeugt so eine radiale Temperaturverteilung auf der Latte, deren Ausgangspunkt die Feuchttemperatur ist. Solange die Feuchttemperatur unter dem Gefrierpunkt liegt, kann sich an der Nabe Eis bilden; wenn sie 0° C erreicht, liegt die Eisgrenze gerade an der Nabe, d. h., die ganze Latte muß eisfrei bleiben.

Die Messung der Feuchttemperatur in der Luft könnte mit einem Thermometer erfolgen, das unmittelbar vor der Latte aufgestellt oder sogar an der Nabe angebracht wäre. Ebensogut und auf bequemere Weise kann die Feuchttemperatur aber auch in einigen Metern Entfernung von der Apparatur, außerhalb des Zerstäubernebel, mit einem gewöhnlichen Aspirationspsychrometer festgestellt werden. Dort muß die gleiche Feuchttemperatur herrschen wie im Zerstäubernebel, wenn auch die Lufttemperaturen verschieden sind. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, daß die Feuchttemperatur diejenige Temperatur ist, die von der Luft bei vollständiger Befeuchtung angenommen wird. In unmittelbarer Nähe der Oberfläche des Thermometers ist die Luft stets völlig befeuchtet und es ist für die Temperatur dort letzten Endes gleichgültig, ob die Befeuchtung erst an dieser Stelle oder teilweise auch schon früher erfolgte, ob also die Luft die erforderliche Abkühlung erst dort oder schon früher erfahren hat<sup>1)</sup>.

Aus demselben Grunde ist es für die Temperatur der Nabe gleichgültig, wie weit die anströmende Luft infolge der Gegenwart der künstlich hineingebrachten Wassertröpfchen bereits mit Wasserdampf gesättigt ist. In unmittelbarer Nähe der feuchten Nabe erreicht die Luft zuletzt stets die Feuchttemperatur, und infolgedessen nimmt die Nabe selbst auch diese Temperatur an.

Man muß zwei verschiedene Arten der Feuchttemperatur unterscheiden, nämlich die Feuchttemperatur für einen wasserbedeckten Körper und die Feuchttemperatur für einen eisbedeckten Körper; die Unterscheidung ist von der psychrometrischen Feuchtigkeitsmessung her bekannt. Da an der Nabe der rotierenden Latte bei den Versuchen stets Eis vorhanden ist, entspricht ihre Temperatur derjenigen eines eisbedeckten Thermometers, und es ist demgemäß diese Temperatur, die sich auch bei der Messung mit dem Aspirationspsychrometer unmittelbar ergibt, zugrunde zu legen.

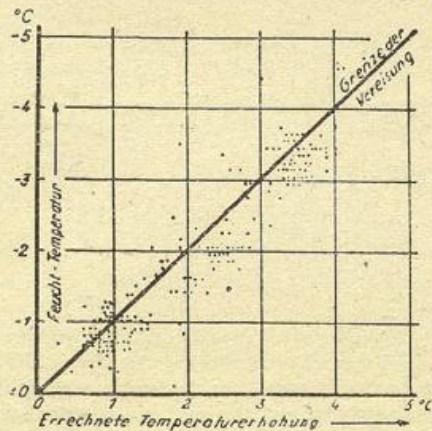
Die Tatsache der Eisbedeckung spielt bei der Erwärmung, die an der Latte infolge der Rotationsbewegung erzeugt wird, eine Rolle. Die eisbedeckte Oberfläche erwärmt sich unter sonst gleichen Verhältnissen etwas weniger als eine wasserbedeckte Oberfläche, weil bei der Verdampfung von Eis nicht nur die Verdampfungswärme des Wassers, sondern außerdem die Schmelzwärme umgesetzt wird. Um das rechnerisch zu berücksichtigen, muß in die Formel (1) für den Wert  $c$  an Stelle des kondensationsadiabatischen nun der sublimationsadiabatische Temperaturgradient<sup>2)</sup> eingesetzt werden, der in dem in Betracht kommenden Bereich etwa um 6 bis 10 % kleiner ist. Die Berechnung der Eisgrenze auf der Latte kann auf diese Weise von den Verhältnissen an der eisbedeckten Nabe erfolgen. Wenn die Eisgrenze auf dem anderen Wege, ausgehend von

<sup>1)</sup> Hierbei sind die Feinheiten der Vorgänge des Wärmeüberganges und der Verdunstung, die für die exakte Psychrometertheorie wichtig sind (s. W. Findeisen, Meteor. Z. 1934, S. 89), unberücksichtigt geblieben. In Wirklichkeit nimmt ein feuchtes Thermometer grundsätzlich eine etwas tiefere Temperatur an, als die Luft bei vollständiger Befeuchtung erreicht. Die Unterschiede können hier aber vernachlässigt werden, da sie das Ergebnis der Untersuchungen nicht fälschen.

<sup>2)</sup> Z. B. Meteor. Taschenbuch, herausgeg. v. F. Linke.

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 56, 453 (1939).

der Feuchttemperatur über wasserbedeckter Oberfläche, unter Benutzung des kondensationsadiabatischen Temperaturgradienten berechnet werden soll, so müßte zuerst die zugehörige Feuchttemperatur für die wasserbedeckte Oberfläche bestimmt werden. Beide Wege führen praktisch zu den gleichen Werten.



Das Ergebnis von 259 in der beschriebenen Weise durchgeführten Messungen wird durch die Abbildung veranschaulicht. Als Ordinate ist dabei die jeweils herrschende Feuchttemperatur der Luft aufgetragen, als Abszisse die Temperaturerhöhung, die sich nach Formel (1) aus der gemessenen Umlaufgeschwindigkeit desjenigen Punktes auf der Latte ergibt, an dem die Eisgrenze festgestellt wurde. In die Formel wurde der für die Verhältnisse an der Stirnkante gültige Wert  $k = 1$  eingesetzt. Das Ergebnis jeder Messung wird in der Darstellung durch einen Punkt charakterisiert; zahlreiche Punkte überdecken sich. Theoretisch müssen alle Punkte auf der ausgezogenen Diagonale liegen, längs der sich Feuchttemperatur und Temperaturerhöhung gerade zu  $0^\circ\text{C}$  ergänzen. Die Darstellung zeigt, daß sich die Meßpunkte tatsächlich eindeutig um diese theoretisch zu erwartende „Grenze der Vereisung“ scharen. Danach kann an der Richtigkeit des Rechnungsansatzes, der für die Erwärmung der Flugzeugteile beim Wolkenfluge aufgestellt und für die Berechnung der Abhängigkeit der Vereisungsgrenze von der Fluggeschwindigkeit zugrunde gelegt wurde, nicht mehr gezweifelt werden.

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, daß bei den beschriebenen Versuchen mit normalen „Vereisungsgeschwindigkeiten“ gearbeitet wurde, d. h. die Dichte des Zerstäubernebelis wurde so bemessen, daß der Eisansatz an der Latte etwa ebenso schnell wuchs wie beim Fluge an den Flugzeugteilen (Tragflächen, Leitwerk, Antennenmast). Die Vereisungsgeschwindigkeit beträgt beim Fluge in Wolken von mittlerer Dichte etwa 1 mm/min, nur in besonders dichten Wolken mehr. Bei den Versuchen am Boden ist es leicht möglich, wesentlich höhere Vereisungsgeschwindigkeiten zu erzeugen, indem der Zerstäubernebel entsprechend dichter gemacht oder indem einfach der Zerstäuber näher an die Latte herangestellt wird. Es zeigte sich, daß dann aber keine quantitative Übereinstimmung zwischen Berechnung und Beobachtung der Eisgrenze auf der Latte mehr herrscht. Bei hohen Vereisungsgeschwindigkeiten, also bei starker Beaufschlagung der vereisenden Teile, ist die Erwärmung geringer als unter normalen Verhältnissen, und es tritt an der Latte infolgedessen noch weiter außen Vereisung ein, als nach der Formel (1) zu erwarten ist.

Auch diese Erscheinung kann theoretisch erfaßt werden. Es ist nämlich zu beachten, daß durch das auftretende Tropfenwasser eine Temperaturerniedrigung an den Stirnkanten hervorgerufen wird. Diese Temperaturerniedrigung beruht nicht auf der Tatsache, daß die in der Luft befindlichen Tropfen bei den Versuchen fast stets kälter sind als die Luft (denn ihre Temperatur sinkt ja nicht unter die Feuchttemperatur, auf die es letzten Endes ankommt), sondern auf dem Unterschied der spezifischen Wärmen von Luft und Wasser. Das Tropfenwasser erwärmt sich bei der Umsetzung von kinetischer Energie in Wärmeenergie infolge seiner höheren spezifischen Wärme bedeutend weniger als die Luft, nämlich nur etwa um den dritten Teil des Temperaturbetrages. Die auf einen schnell bewegten Oberflächenteil auftreffenden Tropfen sind also stets relativ kalt. Bei starker Beaufschlagung können sie den Wärmehaushalt des Oberflächenteiles merklich stören. Die eintretende Temperaturerniedrigung hängt von der auftreffenden Wassermenge einerseits und von der Größe des Wärmeüberganges zwischen Oberfläche und Luft andererseits ab; sie kann aus diesen Größen berechnet werden. Die Rechnung, die in einer besonderen Mitteilung besprochen werden soll, ergibt für normale Beaufschlagungsstärken nur unerhebliche Temperaturerniedrigungen, für hohe Beaufschlagungsstärken, die entsprechend hohe Vereisungsgeschwindigkeiten zur Folge haben würden, jedoch Differenzen von mehr als  $1^\circ\text{C}$ . Damit wird die an der rotierenden Latte bei hohen Vereisungsgeschwindigkeiten festgestellte Erscheinung erklärt.

Auf gleiche Weise ist offenbar die aus der Mitteilung von Voigt<sup>1)</sup> zu entnehmende Tatsache, daß Luftschrauben bei Standversuchen in künstlichem Zerstäubernebel auf der ganzen Länge vereisen, zu erklären. Auch beim Fluge muß die durch das auftreffende Wasser verursachte Temperaturstörung an den Luftschrauben oft merklich werden, weil dort infolge der geringen Profildicke und der hohen Geschwindigkeit bereits hohe Beaufschlagungsstärken herrschen, wenn gleichzeitig die Beaufschlagung an den übrigen Flugzeugteilen nur normal ist. So werden Beobachtungen<sup>2)</sup> verständlich, nach denen bei Flügen an den äußeren Enden der Luftschrauben Vereisung eintrat, obwohl bei der herrschenden Lufttemperatur und Drehzahl eine vollständige Vereisung der Luftschrauben nicht hätte möglich sein sollen. Bei allen Beobachtungen an Luftschrauben ist aber besonders auch zu bedenken, daß die Formel für die Kompressionserwärmung nur für die Stirnkanten der Luftschrauben gilt. An den Seiten der Luftschraubenblätter herrschen infolge der gestörten Druckverhältnisse teilweise wesentlich tiefere Temperaturen; dabei spielt wahrscheinlich auch noch die Wärmeleitung durch das Innere der Luftschraubenblätter eine Rolle. Infolgedessen ist an den Seiten der Luftschraubenblätter noch bei viel höheren Drehzahlen und Temperaturen Vereisung möglich als an den Stirnkanten. — Aus allen diesen Gründen dürfen die Ergebnisse der hier beschriebenen Versuche trotz der äußeren Ähnlichkeit der Bedingungen nicht ohne weiteres für die Frage der Luftschraubenvereisung gewertet werden.

Die mannigfachen interessanten Fragen, die sich aus dem Zusammenhange der Vereisungserscheinungen mit der Kompressions- und Reibungserwärmung ergeben, werden in einer folgenden Arbeit besprochen werden.

<sup>1)</sup> H. Voigt, Deutsche Luftfahrtforschung Nr. 1264.

<sup>2)</sup> M. Diem, Deutsche Luftfahrtforschung Nr. 1482; ferner verdanken wir den Herren Graubner und Gehl diesbezügliche Mitteilungen.

# Forschungs- und Erfahrungsberichte des Reichswetterdienstes

Herausgegeben vom Reichsamt für Wetterdienst

Reihe A, Nr. 27, Berlin 1944

(Nachdruck)

## Experimentelle Untersuchungen über die atmosphärische Eisteilchenbildung I

Von W. Findeisen und G. Schulz, Prag

Im Anschluß an die vor 2 Jahren in der Meteorologischen Zeitschrift veröffentlichte „Vorläufige Mitteilung“<sup>1)</sup> wird mit der vorliegenden Arbeit eine Schriftenreihe eingeleitet, in der ausführlich über die experimentellen Untersuchungen berichtet werden soll, die bei der Wolkenforschungsstelle des Reichsamts für Wetterdienst (Luftwaffe) zur Klärung der Vorgänge der atmosphärischen Eisteilchenbildung durchgeführt wurden. Mit dieser Schriftenreihe sollen Unterlagen und Beweismaterial für die Folgerungen dargelegt werden, die sich aus der Eisteilchenlehre für die Fragen der Wolkenbildung und des Witterungsablaufes, ferner auch für die Fragen der Kondensfahnenbildung und -verhinderung und der technischen Wetterbeeinflussung ergeben. Die Folgerungen selbst werden gesondert besprochen; zum Teil ist das bereits in früheren Arbeiten geschehen<sup>2)</sup>.

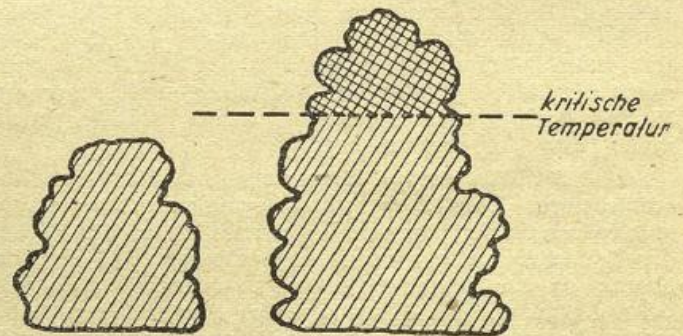
### A. Aufgabenstellung

An dem vielgestaltigen Problem der Eisteilchenbildung ist für die Meteorologie in erster Linie die Frage wichtig, wann, wo und in welchem Umfange, also unter welchen Bedingungen und in welcher Zahl die Eisteilchen in der Atmosphäre entstehen und damit gewisse Wettererscheinungen, insbesondere die Niederschlagsbildung, einleiten. Die Lösung dieser Frage ist daher die vordringlichste Aufgabe, die der meteorologischen Forschung auf dem Gebiete der Eisteilchenbildung zufällt. Dementsprechend wurden die Untersuchungen, über die in der vorliegenden Mitteilung berichtet wird, angesetzt. Sie zielten darauf ab, zunächst einmal die Bedingungen, unter denen die Eisteilchenbildung in der Luft vor sich geht, und den Umfang der Eisteilchenbildung sowohl in der Atmosphäre selbst, als auch durch Nachahmung der atmosphärischen Verhältnisse im Laboratorium festzustellen.

Dieses Vorgehen erwies sich nicht nur für die Bedürfnisse der praktischen Meteorologie als richtig, sondern auch für die Klärung der übrigen Fragen, die mit dem Problem der Eisteilchenbildung zusammenhängen, insbesondere der in den letzten Jahren in der Literatur oft erörterten Frage nach dem Mechanismus der Eisteilchenentstehung. Der umgekehrte Weg, den inzwischen andere Forscher eingeschlagen haben, nämlich ohne ausreichende Kenntnis der für die atmosphärische Eisteilchenbildung maßgeblichen Bedingun-

gen zuerst eine Theorie vom Mechanismus der Eisteilchenbildung anzunehmen und dann diese Theorie auf die Atmosphäre anzuwenden, hat sich dagegen, wie die Ergebnisse zeigen, nicht als richtig erwiesen.

Von welchem Gesichtspunkt aus die für die atmosphärische Eisteilchenbildung maßgeblichen Bedingungen am einfachsten studiert und beschrieben werden können, lehren die Quellwolken. In den Quellwolken erfolgt der Einsatz der Eisteilchenbildung am eindrucksvollsten und am übersichtlichsten. Man kann beobachten, daß Quellwolken, deren Gipfel ein bestimmtes Niveau überschritten haben, Eisteilchen enthalten, während daneben andere Quellwolken, die nicht bis zu diesem Niveau emporgequollen sind, eisteilchenfrei bleiben. Für den Einsatz der Eisteilchenbildung ist neben sonstigen Bedingungen offenbar die Temperatur entscheidend, die in diesem Niveau in den Wolken erreicht wird. Diese Temperatur wird die „kritische Temperatur“ genannt (Abb. 1). Da ihre Kenntnis für die meteorologische Praxis von größter Bedeutung ist, wurde sie zum Hauptgegenstand der im folgenden beschriebenen Untersuchungen gemacht.



(Abb. 1)

Definition der „kritischen Temperatur“

### B. Untersuchungen natürlicher Wolken

#### 1. Technik der Beobachtungen

Anhaltspunkte für den Wert der kritischen Temperatur können aus Beobachtungen der natürlichen Wolken gewonnen werden. Jedoch zeigt die Erfahrung, daß derartige Beobachtungen schwieriger sind und mehr Exaktheit erfordern als es zunächst scheinen mag.

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 59, 349 (1942).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 55, 121 (1938); 56, 429 (1939); 57, 49 (1940); 57, 201 (1940). Zschr. angew. Meteor. 55, 208 (1938); 56, 309 (1939). Jahrb. 1938 d. deutschen Luftfahrtforschung, Erg. Band, S. 102. „Mikrophysik der Wolken“, herausgegeben v. R. F. W. 1939. D (Luft) 1002; D (Luft) 1209. Forsch. u. Erv. Ber. d. R. W. D., Reihe B, Nr. 8 (1942); Reihe A, Nr. 19 (1943).

Bei den Beobachtungen kommt es darauf an, in möglichst vielen verschiedenen Wolken festzustellen, ob Eisteilchen vorhanden sind oder nicht und welche Temperaturen vorher für die Eisteilchenbildung in den Wolken zur Verfügung standen. Die Schwierigkeit der Beobachtungen liegt in der Verbindung von Eisteilchenfeststellung einerseits und zuverlässiger Temperaturbestimmung andererseits.

Die Eisteilchen können verhältnismäßig leicht festgestellt werden, wenn sie eine Größe erreicht haben, die diejenige der gleichzeitig im Raum vorhandenen Wassertropfen erheblich übertrifft. In diesem Falle ist aber die Bestimmung der Temperatur, die bei der Entstehung der Eisteilchen herrschte, schwierig. Die Teilchen entfernen sich während der Zeit, die sie zum Wachsen bis zur Feststellbarkeitsgröße benötigen, infolge ihrer Fallbewegung und vor allem infolge von Vertikalbewegungen der Luft beträchtlich von ihrem Entstehungsniveau. Man muß sich aus diesem Grunde damit begnügen, jeweils nur das Temperaturminimum zu bestimmen, das in den Wolken zur Zeit ihrer höchsten Entwicklung erreicht wurde. Diese „Tiefsttemperatur“ liegt, falls Eisteilchen entstanden sind, sicher unter der kritischen Temperatur und gibt somit einen brauchbaren Anhaltspunkt. Da die Tiefsttemperatur von der Gipfelhöhe der Wolken abhängt, die sich bekanntlich vielfach schnell ändert, genügt es meist nicht, sie erst dann festzustellen, wenn sich bereits große Eisteilchen in den Wolken gebildet haben oder sogar schon als Niederschlag ausfallen. Besonders bei Quellwolken ist die starke Veränderlichkeit der Gipfelhöhe zu beachten. Quellwolken, die gut feststellbare, also verhältnismäßig große Eisteilchen enthalten, sind meist schon stark geschrumpft und täuschen so viel zu hohe kritische Temperaturen vor. Wie man hin und wieder aus der Literatur entnehmen kann, sind manche Beobachter dieser Täuschung zum Opfer gefallen; z. B. finden die Beobachtungen, nach denen die Bildung großtropfigen Regens bei Temperaturen über 0° C stattgefunden haben müßte, zumindest größtenteils auf diese Weise ohne Widerspruch mit der Eisteilchenlehre ihre einfache Erklärung. Auch bei Schichtwolken muß die Veränderlichkeit der Obergrenze bedacht werden, wenn der am Boden ankommende Niederschlag mit der Tiefsttemperatur der darüber befindlichen Wolken in Verbindung gebracht wird. Die Fallzeiten der von Schichtwolken gelieferten, verhältnismäßig kleinen Niederschlagsteilchen liegen normalerweise in der Größenordnung von Stunden; besonders groß sind sie im Sommer, weil dann die Fallstrecken oft mehr als 6 km betragen. Während der langen Fallzeiten kann sich die Höhe der Wolkenobergrenze über den fallenden Teilchen infolge von Vertikalbewegungen der Luft oder infolge von Advektion (wegen der vertikalen Veränderlichkeit des Windes) stark verändern.

Die Bestimmung der für die Eisteilchenbildung in einer Wolke zur Verfügung stehenden Tiefsttemperatur könnte zweifelsfrei erfolgen, wenn es möglich wäre, die Messung nur ganz kurze Zeit nach Beginn der Eisteilchenbildung durchzuführen. Hierbei bereitet aber die Erkennung der Eisteilchen größte Schwierigkeiten. Die kleinen Eisteilchen werden bei der Beobachtung allzuleicht übersehen, besonders wenn sie nur in sehr geringer Zahl vorhanden sind, wie das bei Tiefsttemperaturen zutrifft, die nur wenig unterhalb der kritischen Temperatur liegen.

Aus allen diesen Gründen ist man gezwungen, zur Feststellung der kritischen Temperatur jeweils zwei aufeinanderfolgende Beobachtungen durchzuführen, nämlich in jeder der für die Untersuchungen ausgewählten Wolken zuerst die Tiefsttemperatur zu messen und dann, nach einer gewissen Zeit, die zum genügenden Wachstum der Eisteilchen ausreicht, zu beob-

achten, ob in der betreffenden Wolke Eisteilchen entstanden sind oder nicht. Bei anderem Vorgehen müssen sich systematische Fehler ergeben, und zwar werden durch diese Fehler im allgemeinen zu hohe kritische Temperaturen vorgetäuscht.

Die Beobachtungen können zweifellos am besten vom Flugzeug aus durchgeführt werden. Die Tiefsttemperatur veränderlicher Wolken läßt sich nur beim Durchfliegen mit Sicherheit bestimmen, und der Eisteilchengehalt der Wolken kann beim Durchfliegen schon zu einem Zeitpunkt festgestellt werden, in dem die äußere Form der Wolken noch keine Aufschlüsse darüber gibt. Die Beobachtungen vom Flugzeug aus erfordern allerdings große Aufmerksamkeit.

Zur Temperaturmessung genügt die Ablesung eines hinreichend empfindlichen Bordthermometers auf ganze Grade. Es ist aber zu beachten, daß die Thermometerangabe nicht nur durch Stau- und Reibungserwärmung, sondern außerdem durch die beim Vereisungsvorgang am Thermometerkörper freiwerdende Schmelzwärme des Wassers gefälscht wird. Bei unsorgfältiger Beobachtung werden auch hier wieder zu hohe Temperaturwerte gewonnen und infolgedessen zu hohe kritische Temperaturen vorgetäuscht. Die Stau- und Reibungserwärmung kann in bekannter Weise rechnerisch berücksichtigt werden, und zwar ist, wie an anderer Stelle auseinandergesetzt wurde<sup>1)</sup>, bei den hier in Betracht kommenden Lufttemperaturen trotz des Wolkenfluges die für den wolkenfreien Raum gültige Korrekursionsformel anzuwenden. Die durch die Eisbildung am Thermometerkörper hervorgerufene Wärmetönung läßt sich hingegen nicht rechnerisch berücksichtigen. Bei gedrunghenen Thermometerkörpern, d. h. solchen, die im Verhältnis zu ihrem Strömungsquerschnitt nur kurze Erstreckung in der Strömungsrichtung haben, also insbesondere bei kugelförmigen oder zylindrischen Thermometerkörpern, verursacht schon mäßige bis starke Vereisung eine Temperaturerhöhung von mehreren Grad. Bei langgestreckten Thermometerkörpern hingegen ist der Effekt wesentlich geringer. Nach Erfahrungen, die in anderem Zusammenhang gewonnen wurden<sup>2)</sup>, bleibt er schon bei dem Dickenverhältnis 1:10 normalerweise unter 1° C und kann infolgedessen bei den üblichen Formen der elektrischen Bordthermometer hingenommen werden.

Zur Feststellung des Eisteilchengehaltes beim Durchfliegen einer Wolke ist es nötig, die Wolkenelemente aufzufangen. Das kann in einfacher Weise durch Aufprallenlassen auf irgendeinen Gegenstand erfolgen, dessen Luvseite dabei aus geringer Entfernung beobachtet wird. Die Eisteilchen sind dann daran erkennbar, daß sie beim Aufprall je nach Größe kleinere oder größere weiße Fleckchen hinterlassen, während die anfrrierenden Wassertropfen einen gleichmäßigen Eisbelag erzeugen. Von offenen Flugzeugen aus ist die Beobachtung einfach; im offenen Flugzeug erlebt der Beobachter Wetter und Wolken unmittelbar und es ist für ihn naheliegend, den Eisteilchenaufprall auf der ausgestreckten, behandschuhten Hand zu verfolgen. Von geschlossenen Flugzeugen aus wird, wie die Wetterfliegerfahrten zeigten, der Eisteilchengehalt der durchflogenen Wolken sehr oft nicht vom Beobachter bemerkt. An den Kanzelscheiben kann man kleine Eisteilchen nicht erkennen, ebenso nicht an den anderen beaufschlagten Teilen des Flugzeuges, weil diese Teile beim Fluge normalerweise nicht aus nächster Nähe betrachtet werden können. Aber auch von geschlossenem Flugzeug aus lassen sich die Eisteilchen sicher feststellen, wenn man entweder auch hier die Hand oder

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Forsch. u. Erf. Ber. d. R. W. D., Reihe A, Nr. 11 (1941).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Deutsche Luftfahrtforschung, Mitteilung Nr. 691 (1942).

irgendeinen Gegenstand seitlich aus dem Rumpf hinaushält oder sich einer einfachen kleinen Vorrichtung bedient, nämlich eines „Beobachtungsstabes“ von etwa 2 cm Durchmesser und 30 cm Länge, der gut sichtbar außen am Rumpf angebracht wird. An einem solchen Stab kann das Aufprallen von Eisteilchen bis schätzungsweise zur Größe  $r = 10^{-2}$  cm herunter einwandfrei beobachtet werden. Auch eine ungefähre Schätzung der Zahl der in der Luft enthaltenen Eisteilchen ist mit Hilfe des Beobachtungsstabes möglich, da man auf Grund der Untersuchungen von Albrecht<sup>1)</sup> annehmen kann, daß der größte Teil derjenigen Teilchen, die sich in dem vom Stab bei der Flugbewegung verdrängten Luftvolumen befinden, zum Aufprall gelangt. Das verdrängte Luftvolumen beträgt rund  $\frac{1}{2}$  m<sup>3</sup>/sec. Es ist danach möglich, einen Eisteilchengehalt von der Größenordnung 1 Teilchen pro Kubikmeter noch mit Hilfe des Beobachtungsstabes festzustellen.

Mehr Schwierigkeiten, als es scheinen mag, verursacht die Verfolgung des Entwicklungsganges der Wolken vom Flugzeug aus und das Erfliegen der Tiefsttemperatur im richtigen Augenblick. Den Entwicklungsgang kann man nur bei Quellwolken, bei denen die Natur das Experiment der Eisteilchenbildung auf überschaubar kleinem Raume und in genügend kurzer Zeit ausführt, vom Flugzeug aus verfolgen. Bei den Schichtwolken muß man sich damit begnügen, einen vorhandenen Zustand festzustellen, und es kann dabei zu den schon genannten Irrtümern kommen. Die Quellwolken haben vielfach so große Vertikalgeschwindigkeiten, daß es nicht möglich ist, mit dem Flugzeug zu folgen. Es ist daher nötig, das Flugzeug von vornherein in der Nähe der Gipfelhöhe der in Betracht kommenden Quellungen zu halten und dort die geeigneten Wolken zu erwarten. Bei dem Versuch, günstig aussehende Wolken aus größerer Entfernung anzufliegen, kommt man stets zu spät, denn das Wiederabsinken der emporgequollenen Türme erfolgt meist überraschend schnell. Das Abwarten der geeigneten Quellungen und die Durchführung der nötigen Einflüge in die Wolken erfordert lange Flugzeiten und somit einen hohen Aufwand, bevor es möglich ist, einigermaßen enge Grenzen für die kritische Temperatur anzugeben. Die Beobachtungen konnten deshalb bisher fast sämtlich nur gelegentlich der Durchführung anderer Flugaufgaben gesammelt werden und dabei nur in einem Umfange, der genauere Rückschlüsse auf die für Eisteilchenbildung maßgeblichen Bedingungen noch nicht zuläßt. Die Ergebnisse der Beobachtungen aus 10 Jahren, wobei die Beobachtungen in den letzten 8 Jahren systematisch durchgeführt wurden, liefern aber eine richtungweisende Grundlage für die im nächsten Abschnitt beschriebenen Laboratoriumsuntersuchungen und ermöglichen darüber hinaus Vergleiche zwischen den im Laboratorium nachgebildeten Wolken und der Natur.

Es liegt nahe, zur Feststellung der kritischen Temperaturen das reichhaltige Beobachtungsmaterial heranzuziehen, das von den Wetterflugstellen in nun fast 20 Jahren zusammengetragen wurde. Dabei ist aber zu bedenken, daß die in den Wetterflug-Klartexten genannten Beobachtungen über den Eisteilchengehalt der Wolken nur in wenigen Fällen systematisch und ad hoc angestellt wurden, sondern daß es sich fast durchweg nur um zufällige Beobachtungen handelt. Sie sind daher zweifellos mit den besprochenen Fehlern, die bei der Bestimmung der Tiefsttemperaturen und bei der Feststellung des Eisteilchengehalts unterlaufen können, behaftet. In welcher Richtung die Ergebnisse gefälscht sind, läßt sich nicht angeben, da einerseits durch fehlerhafte Bestimmungen der Tiefsttemperaturen zu hohe, andererseits durch Übersehen vorhandener Eis-

teilchen zu tiefe kritische Temperaturen vorgetäuscht werden. Infolge der Fehlerquellen und auch infolge der Verschiedenheit der hier besonders wichtigen meteorologischen Erfahrungen der einzelnen Beobachter muß eine starke Streuung der Ergebnisse entstehen. Tatsächlich zeigt die sehr gründliche statistische Bearbeitung des Wetterflugbeobachtungsmaterials aus 5 Jahren, die W. Peppler<sup>1)</sup> durchgeführt hat, diese Streuung. Die Statistik gibt aber dennoch wertvolle Hinweise und ermöglicht Vergleiche mit den Ergebnissen der übrigen Untersuchungsmethoden.

Beobachtungen zur Bestimmung der kritischen Temperatur können manchmal auch ohne Luftfahrzeug vom Boden aus durchgeführt werden. Da man aber hierbei darauf angewiesen ist, das Anwachsen der Eisteilchen so weit abzuwarten, daß die äußere Form der Wolken oder der ausfallende Niederschlag einen eindeutigen Schluß auf die erfolgte Eisteilchenbildung zulassen, ergeben sich die bereits oben genannten Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Tiefsttemperatur. Verhältnismäßig einfach ist die Beobachtung, wenn die Eisteilchenbildung in tiefen Wolken stattfindet, z. B. in winterlichem Nebel oder Hochnebel, über dessen Obergrenze und Tiefsttemperatur mit Hilfe von Aufstiegsgeräten zuverlässige Aufschlüsse gewonnen werden können. Aber auch hierbei ist die Veränderlichkeit der Obergrenze zu beachten. Besonders ist das bei den Wolkenbeobachtungen nötig; die gelegentlich von Bergbesteigungen nacheinander von Berg und vom Tal aus durchgeführt werden und dem unkritischen Beobachter leicht einen ganz falschen Wert der kritischen Temperatur und ein ebenso unzutreffendes Bild von der Niederschlagsentstehung vortäuschen.

Auch bei Quellwolken ist die Beobachtung vom Boden aus gelegentlich möglich. Hierzu ist zunächst die Gipfelhöhe der in Betracht kommenden Wolken im Augenblick der Kulmination mit Entfernungsmesser und Theodolit oder durch Doppelanschnitt zu messen. Auf Grund des Wertes dieser Höhe und der Lufttemperatur und -feuchte am Boden kann dann die Tiefsttemperatur der Wolken mit Hilfe eines Adiabatenblattes angenähert ermittelt werden; natürlich sind auch dabei wieder Fehlerquellen gegeben. Die vermessenen Wolken sind so lange zu beobachten, bis ihre Form mit Sicherheit erkennen läßt, ob in ihnen Eisteilchen enthalten sind oder nicht. Die Beobachtung wird durch die Tatsache erleichtert, daß die Quellwolken im Stadium der Auflösung auch kleine Eisteilchenmengen zweifelsfrei erkennen lassen. Die Restformen von Quellwolken, die lediglich Wassertropfen enthalten, sind deutlich von Restformen eisteilchenhaltiger Quellwolken unterscheidbar<sup>2)</sup>. Der Wasserwolkenrest zeigt nur schwadiges Aussehen, während im Mischwolkenrest der Eisteilchen-Fallstreifen, der oberhalb der Wolkenuntergrenze deutlich hervortritt.

## 2. Ergebnisse

Die Eisteilchenbildung erfolgt keinesfalls so, daß oberhalb eines bestimmten Niveaus, in dem die Temperatur einen bestimmten Wert erreicht, die Wassertropfen einer Wolke plötzlich durch Eisteilchen ersetzt werden. Die Vorstellung, daß alle Wassertropfen bei Erreichen einer bestimmten Temperatur spontan zu Eisteilchen gefrieren, muß schon danach verworfen werden. Eine Wasserwolke geht über einem bestimmten Niveau nicht in eine Eiswolke über, sondern jedenfalls zunächst in eine „Mischwolke“, in der die Eisteilchen nur einen Teil der suspendierten Wolkenelemente

<sup>1)</sup> F. Albrecht, Physik. Zschr. 32, 51 (1931).

<sup>1)</sup> W. Peppler, Forsch. u. Erf. Ber. d. R. W. D., Reihe B, Nr. 1 (1940).

<sup>2)</sup> W. Findelsen, Zschr. angew. Meteor. 57, 176 (1940).

darstellen. Diese Tatsache, die sich schon bei früheren, den systematischen Untersuchungen vorausgegangenen Flügen ergab und wohl keinem der erfahrenen Wetterflieger entgangen ist, wurde in der schematischen Abb. 1 bereits vorweg berücksichtigt.

Bemerkenswerterweise zeigte sich, daß die Eisteilchenmenge im Vergleich zur Menge der Wassertropfen in den Mischwolken zunächst zahlenmäßig immer sehr gering ist. Auch in den Fällen, in denen besonders viele Eisteilchen vorhanden waren, konnten die auf dem Beobachtungsstab auftreffenden Eisteilchen noch gut einzeln erkannt werden; wenn die Eisteilchen auch nur annähernd so zahlreich gewesen wären wie die Wassertropfen, wäre das, wie man leicht abschätzen kann, nicht möglich gewesen. Die Untersuchungen zeigten ferner, daß die Zahl der Eisteilchen, die in frisch gebildeten Mischwolken angetroffen werden, unter verschiedenen Verhältnissen um Größenordnungen schwankt. Die Eisteilchenzahl ist im allgemeinen um so größer, je tiefer die Tiefsttemperatur in der betreffenden Wolke ist. Je mehr die kritische Temperatur, die für das Erscheinen der ersten Eisteilchen charakteristisch ist, unterschritten wird, um so zahlreicher werden die Eisteilchen. Bei der kritischen Temperatur selbst bilden sich nur ganz wenige Eisteilchen, schätzungsweise nur einige pro Kubikmeter.

Eines der wesentlichsten Ergebnisse, das die Untersuchungen erbrachten, ist die Tatsache, daß die kritische Temperatur keine Konstante darstellt. Es läßt sich zwar bei einer Reihe nebeneinander gewachsener Quellwolken, die sämtlich unter ganz ähnlichen Bedingungen entstanden sind, ein bestimmter, einheitlicher Wert der kritischen Temperatur herausfinden, aber es zeigte sich, daß unter anderen Witterungsverhältnissen ein anderer Wert der kritischen Temperatur gilt. Bestimmte Tiefsttemperaturen reichen im einen Falle zur Eisteilchenbildung aus, im anderen Falle nicht.

Als Extremfall wurde einerseits bei Quellwolken, die am 25. 7. 38 über Württemberg beobachtet wurden und Gipfelhöhen von 6 000 bis 7 000 m erreichten, die kritische Temperatur zwischen  $-19^{\circ}$  und  $-20^{\circ}$  festgestellt. Andererseits wurden am 26. 3. 39 über Süd-Hannover (übrigens bei einer Freiballonfahrt) in einem Stratus, dessen Tiefsttemperatur nicht unter  $-6^{\circ}$  lag, bereits Eisteilchen beobachtet; dabei wurde mit Sicherheit festgestellt, daß die Eisteilchen nicht etwa aus höheren Schichten in den Stratus hineingefallen sein konnten. Der Unterschied der kritischen Temperaturen in den beiden Extremfällen betrug also mindestens  $13^{\circ}$  C!

In einer anderen Arbeit<sup>1)</sup> wurde bereits mitgeteilt, daß nach Beobachtungsergebnissen, die bei Flügen über ausgedehnten Seegebieten gewonnen wurden, die kritischen Temperaturen über See im allgemeinen höher liegen als über Land. Bei einigen Quellwolkenuntersuchungen, die zwar exakt durchgeführt wurden, aber ihrer geringen Zahl wegen keinen weitergehenden Schluß zulassen, wurden kritische Temperaturen von etwa  $-8^{\circ}$  bis  $-10^{\circ}$  ermittelt. Die statistische Auswertung zufälliger Beobachtungen von Eis- und Wasserwolken über See führt im Vergleich zu der genannten, von W. Pepler aufgestellten Statistik der Wetterflugbeobachtungen über Land zu dem mittleren Unterschiedsbetrag von etwa  $5^{\circ}$  zwischen den kritischen Temperaturen über See einerseits und über Land andererseits.

Alle diese Ergebnisse der bei Flügen durchgeführten Wolkenuntersuchungen geben interessante Einblicke, reichen aber nicht aus, die offenbar vielgestaltigen Erscheinungen der Eisteilchenbildung richtig zu deu-

ten und zu verstehen. Hierzu wären nicht nur viel zahlreichere, sondern auch noch im einzelnen genauere Untersuchungen nötig. Da derartige Untersuchungen aber einen unvermeidbar hohen Aufwand erfordern würden, erschien es schon bald notwendig, sie durch geeignete Laboratoriumsuntersuchungen zu ersetzen.

## C. Laboratoriumsuntersuchungen

### 1. Ziel und Anlage der Untersuchungen

Die Laboratoriumsuntersuchungen waren von vornherein auf das Ziel gerichtet, die Eisteilchenbildung unter Bedingungen zu studieren, die in den maßgeblichen Größen möglichst weitgehend den natürlichen Verhältnissen entsprechen. Im Laboratorium wurden künstliche Wolken erzeugt, und in diesen künstlichen Wolken wurde die Eisteilchenbildung bei verschiedenen Tiefsttemperaturen nach den gleichen Gesichtspunkten beobachtet, wie das bei den Flügen in den natürlichen Wolken geschehen ist. Nur auf diese Weise konnten Ergebnisse erwartet werden, die Hand in Hand mit vergleichenden Beobachtungen an natürlichen Wolken praktisch brauchbare Aufschlüsse über die atmosphärische Eisteilchenbildung liefern.

Da die Natur das Experiment der Wolkenbildung und der Eisteilchenerzeugung am übersichtlichsten in den Quellwolken ausführt, lag es nahe, auch für die Laboratoriumsuntersuchungen in erster Linie den Vorgang der Quellwolkenbildung auszuwählen. Hierzu wurde ein gewisses Luftvolumen den gleichen thermodynamischen Bedingungen unterworfen, denen es bei der Vertikalbewegung in der Atmosphäre ausgesetzt ist. So wurde in den Luftvolumen die Entstehung suspendierter Wassertropfen und Eisteilchen, also die Entstehung einer Wasserwolke, Mischwolke oder Eiswolke in gleicher Weise hervorgerufen, wie sie erfolgt wäre, wenn das Luftvolumen im Zuge eines Quellvorganges eine entsprechende Vertikalbewegung in der Atmosphäre ausgeführt hätte. Bei dieser Versuchsdurchführung war es möglich, die Eisteilchenentstehung in Abhängigkeit von der Temperatur unter atmosphärischen Bedingungen im Laboratorium zu beobachten.

Die Laboratoriumsuntersuchungen boten gegenüber den Beobachtungen bei Flügen nicht nur den Vorteil des geringeren Aufwandes, sondern darüber hinaus den Vorteil, daß die thermodynamischen Daten genauer gemessen und vor allem sogar gewählt und vom Versuch zu Versuch systematisch verändert werden konnten. Kondensationsniveau, Tiefsttemperatur und Vertikalgeschwindigkeit konnten wahlweise eingestellt und damit die thermodynamischen Bedingungen nachgeahmt werden, die in verschiedensten Quellwolken herrschen. Auf diese Weise wurde ein sehr aufschlußreiches Bild von den für die Eisteilchenbildung notwendigen Voraussetzungen gewonnen.

In einer zweifellos nicht unwesentlichen Hinsicht konnten die Laboratoriumsuntersuchungen vorerst noch nicht allen natürlichen Verhältnissen entsprechen, nämlich in der Wahl der Luft, die zur künstlichen Wolkenbildung verwendet wurde. Die Untersuchungen, über die hier zunächst berichtet wird, wurden ausschließlich mit einer ortsfesten Apparatur durchgeführt und mußten sich daher auf diejenige Luft beschränken, die sich jeweils am Beobachtungsort, in nächster Nähe des Laboratoriums befand. Aus der freien Atmosphäre konnte keine Luft eingeholt werden; wenn der Gehalt der Luft an Suspensionen, auf die es hier ja ankommt, nicht gestört werden soll, ist das sehr schwierig. Durch die Beschränkung auf die in Bodennähe vorhandene Luft verlieren die Untersuchungen aber nicht ihre Vergleichbarkeit mit der atmosphärischen Wolkenbildung, denn auch in der

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Forsch. u. Erf. Ber. d. R. W. D., Reihe B, Nr. 8.

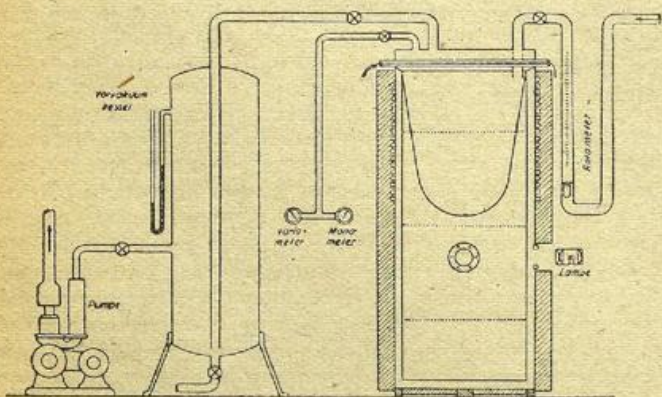
Atmosphäre, nämlich in allen Wolken mit „Bodenanschluß“, wird die Wolkenbildung bekanntlich in der aus Bodennähe stammenden Luft erzeugt. Hinsichtlich des Suspensionsgehaltes der Luft kommen die Laboratoriumsbedingungen demnach denjenigen der Cumuli und Cumulonimben gleich.

Hierbei taucht allerdings noch die Frage auf, inwieweit die jeweils bei den Versuchen benutzte Luft durch besondere Verunreinigungen, wie sie z. B. Industrieanlagen verursachen, künstlich verändert wurde, ob also die Lage des Versuchsortes als hinreichend repräsentativ angesehen werden kann. Auch diese Frage ist zu bejahen. Die Versuchsanlage wurde in den Jahren 1938 bis 1940 in Friedrichshafen am Bodensee betrieben, seither in Prag, und zwar in dem westlich, 30 m über dem Stadtzentrum gelegenen Stadtteil Dewitz. Die Tatsache, daß an beiden Orten die Stadt- und Industrieinflüsse zwar nicht besonders groß, aber doch immerhin vorhanden waren, bedeutet nicht, daß den Versuchen unnatürliche Verhältnisse zugrunde liegen. Denn es ist zu bedenken, daß sich in den meisten Gegenden Mitteleuropas Verunreinigungen der Luft infolge der Industrialisierung bemerkbar machen: das geht aus den bekanntgewordenen Ergebnissen der zahlreichen Messungen mit Kernzählern hervor. Da die Versuche nicht nur an einem einzigen Tage durchgeführt, sondern an vielen verschiedenen Tagen wiederholt wurden, an denen verschiedenste Windrichtungen und Wetterlagen herrschten, kann mit Sicherheit angenommen werden, daß zumindest ein Teil der dabei gewonnenen Ergebnisse mit solcher Luft durchgeführt wurde, die dem mittleren Verunreinigungsgrad entspricht, mit dem bei der Wolkenbildung im mitteleuropäischen Raume zu rechnen ist.

## 2. Aufbau und Wirkungsweise der Quellwolkenapparatur

Die Quellwolkenapparatur besteht hauptsächlich aus einem Kessel, in dem der Luftdruck durch Auspumpen erniedrigt wird, so daß infolge der adiabatischen Expansion in der eingeschlossenen Luft Wolkenbildung eintritt. Dabei ist die Apparatur technisch so ausgestaltet, daß 1. die Wolkenbildung in einem Luftvolumen beobachtet werden kann, dessen Größe der meteorologischen Aufgabenstellung angepaßt ist, 2. die adiabatische Temperaturerniedrigung mit denselben Geschwindigkeiten erfolgt wie bei der Quellwolkenbildung in der Atmosphäre und 3. die Ausgangswerte von Temperatur und Feuchte weitgehend verändert werden können.

Der Aufbau der Apparatur ist in Abb. 2 dargestellt.



(Abb. 2)

Der Versuchskessel hat bei einer Höhe von 2,5 m und einem Durchmesser von 1 m einen Rauminhalt von 2 m<sup>3</sup>; er ist also im Vergleich zu den Rezipienten der gebräuchlichen Kondensationskernzähler, in denen

ja auch Wolkenbildung durch adiabatische Expansion erzeugt wird, sehr groß. Diese Größe ist einesteils notwendig, um bei den Versuchen die Eisteilchenbildung auch dann noch feststellen zu können, wenn es sich nur um einige Teilchen pro Kubikmeter handelt; nach den Erfahrungen, die bei den Untersuchungen natürlicher Wolken gesammelt wurden, kommen derart geringe Eisteilchenzahlen oft vor und können auch bereits meteorologisch bedeutungsvoll werden. Anderenteils ist der verhältnismäßig große Rauminhalt des Versuchskessels notwendig, um auch bei den geringen Expansionsgeschwindigkeiten, die den natürlichen Verhältnissen entsprechen, einen einigermaßen störungsfreien Verlauf des adiabatischen Prozesses zu ermöglichen. Bei langsamer Expansion spielt die Wärmestörung, die von den Kesselwänden ausgeht und sich infolge von Konvektion und Strahlung der Versuchsluft mitteilt, bereits eine sehr große Rolle. Sie würde auch noch bei der gewählten Kesselgröße die adiabatische Temperaturerniedrigung auf einen Maximalbetrag von wenigen Grad begrenzen, wenn nicht Konvektion und Strahlung in dem Kessel mit Hilfe einer besonderen Vorrichtung weitgehend abgeschirmt wären.

Zu diesem Zweck ist in den Kessel ein Hohlzylinder aus blanker Aluminiumfolie eingehängt worden, der den eigentlichen Versuchsraum allseitig abgrenzt. Der Abstand zwischen Folienzylinder und Kesselwand beträgt etwa 8 cm. Die Folie hat eine Stärke von 0,012 mm, ihre Wärmekapazität ist also gering. Um den Luftaustritt aus dem Folienzylinder bei der Expansion zu ermöglichen, sind viele Löcher von 4 mm Durchmesser in die Folie eingestanz worden. Durch diese Löcher kann die an den Kesselwänden relativ erwärmte Luft nicht in den Versuchsraum eindringen. Die Löcher sind außerdem so angebracht worden, daß in erster Linie die aus der Nähe der Folienwände stammende Luft, deren Temperatur gestört ist, aus dem Versuchsraum abgesaugt wird. Besonders viele Löcher (2 000) befinden sich im Boden des Folienzylinders und verhindern dort das Aufsteigen von Schwaden relativ erwärmter Luft in den Versuchsraum. Ferner dienen 3 Lochkränze im Zylindermantel zum Absaugen der temperaturgestörten Luft.

Alle diese Maßnahmen reichen nicht aus, den adiabatischen Vorgang im Versuchsraum in einem größeren Bereich störungsfrei zu gestalten. Solange die Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Versuchsraum und den Kesselwänden nur wenige Grad beträgt, sind zwar praktisch keine Abweichungen gegenüber der Trocken- oder Feuchtadiabaten feststellbar, aber bei größeren Temperaturdifferenzen, und besonders bei geringen Luftdichten wird die schädliche Wärmezufuhr zum Versuchsraum trotz der Abschirmung bald so groß, daß die adiabatische Temperaturabnahme wesentlich verlangsamt und schließlich gänzlich unterbunden wird. Die völlig naturgetreue Nachahmung des Bildungsvorganges von Quellwolken gelingt infolgedessen mit der Apparatur nur in einem Druckbereich, der den ersten 1 000 bis 1 500 m in der Atmosphäre entspricht. Bei größeren Druckänderungen treten in zunehmendem Maße Abweichungen auf, die u. U. bei der Beurteilung der Messungsergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Trotz dieses Mangels der Apparatur ist es aber möglich, auch noch bei verhältnismäßig tiefen Temperaturen naturgetreue thermodynamische Verhältnisse im Versuchsraum zu schaffen, nämlich durch Kühlung des ganzen Versuchskessels. Mit Hilfe der Kühlung können die Ausgangstemperaturen bei den Versuchen eingestellt werden. Sie werden zweckmäßig so gewählt, daß sie nur wenige Grad über denjenigen Temperaturen liegen, bei denen jeweils die Wolkenbildung beobachtet werden soll.

Zur Kühlung ist die obere Hälfte des Versuchskessels mit einem Gummischlauch von etwa 100 m Länge und 13 mm lichter Weite eng umwickelt, durch den Kühlflüssigkeit von einer besonderen Kühlanlage aus hindurchgeleitet wird. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Kühlanlagen in Betrieb, genommen. Bei allen diente festes Kohlendioxyd (Trockeneis) als Kühlmittel. Bei der zuletzt in Betrieb befindlichen Anlage wird als Kühlflüssigkeit Methanol verwendet, das durch Hindurchleiten durch eine im Kühlbehälter verlaufende Rohrschlange abgekühlt wird. Der Kühlbehälter hat die Größe  $45 \times 90 \times 45$  cm und wird mit Trockeneis und Methanol gefüllt. Bei der Pumpe handelt es sich um eine Kreispumpe mit kältebeständigen Dichtungen, die unter den Betriebsverhältnissen etwa 30 l/min leistet. Zur Wärmeisolation der Kühlanlage und des Versuchskessels ist vorwiegend Glaswolle benutzt worden. Die Kühlvorrichtung ermöglicht eine Abkühlung des Versuchskessels bis auf etwa  $50^\circ$  unter Laboratoriumstemperatur.

Mit Hilfe der Kühlung läßt sich auch die Ausgangsfeuchte regulieren. Nach dem Einleiten frischer Luft in den gekühlten Versuchskessel bildet sich an den zunächst relativ kalten Kesselwänden ein Reifbelag, auf dessen Dampfdruck sich die Feuchte im Kessel allmählich einstellt. Je nachdem, in welchem Zeitabstand nach dem Einleiten der Expansionsversuch durchgeführt wird, ist der Ausgangsdampfdruck größer oder kleiner. Bei Versuchen, bei denen es auf besonders geringe Ausgangsfeuchten ankommt, wird die Luft vor dem Einleiten in den Versuchskessel getrocknet, indem sie durch ein System von 21 Stück parallelgeschalteter Rohre von 12 mm lichter Weite geleitet wird, das sich in einem Trockeneis-Methanol-Kältebad befindet. Dieser Röhrenkühler ist in Abb. 5 nicht mit dargestellt worden.

Das Expandieren der Luft im Versuchskessel erfolgt mit Hilfe einer Wälzpumpe, deren Leistung  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einem Kraftbedarf von 1 PS beträgt. Um den Expansionsvorgang gut regeln zu können, ist zwischen Pumpe und Versuchskessel ein Vorvakuumkessel von  $0,6 \text{ m}^3$  Rauminhalt zwischengeschaltet worden. Er erleichtert die Einstellung der jeweils im Versuchskessel gewünschten Expansionsgeschwindigkeit und ermöglicht durch Aufspeicherung der Pumpenleistung vor allem die Erzeugung von hohen Expansionsgeschwindigkeiten, die bei unmittelbarem Anschluß der Pumpe an den Versuchskessel nicht erreicht werden könnten. Die Füllung des Versuchskessels mit Frischluft erfolgt jeweils nach Auspumpen auf meist etwa 300 mb durch eine Rohrleitung von 5 cm lichter Weite, die durch die Wand des Laboratoriums hindurch ins Freie führt. Um die Einströmungsgeschwindigkeit gleichmäßig gering halten zu können, so daß Beschädigungen der dünnen Aluminiumfolie vermieden werden, ist ein Durchflußmesser (Rotameter) angebracht worden.

Der Expansionsvorgang im Versuchskessel wird mit Hilfe eines Manometers und eines Variometers verfolgt und reguliert. Der Ausschlag des Variometers ist bekanntlich dem Wert  $\frac{dp}{dt} \cdot \frac{1}{p}$  [sec<sup>-1</sup>], unter atmosphärischen Verhältnissen infolgedessen unmittelbar der Höhenänderung pro Zeiteinheit proportional.

Zur Temperaturmessung dient ein im Folienzylinder lose aufgehängter Platindraht von  $40 \mu$  Durchmesser und 1,2 m Länge, dessen Widerstand in einer Brückenschaltung durch den Ausschlag des Brückengalvanometers gemessen wird. Das Brückengalvanometer ist unmittelbar in Temperatureinheiten geeicht worden; die Gültigkeit der Eichung wurde von Zeit zu Zeit im Ruhezustand des Versuchskessels mit Hilfe eines von oben in den Versuchsraum eingeführten Quecksilberthermometers nachgeprüft. Da der lange Platin-

draht die Temperatur fast über den ganzen Querschnitt des Versuchsraumes mittelt und somit keinen Aufschluß über die kleinräumigen Temperaturschwankungen gibt, wurden besondere Versuche mit einem zweiten Widerstands-Thermometer durchgeführt, bei dem der Platindraht auf eine Haspel aufgewickelt war, ähnlich wie der Leuchtfaden bei einer Glühlampe älterer Bauart. Die Wärmekapazität der Haspel war möglichst gering gehalten; der aufgewickelte Draht umschloß einen Raum von  $45 \text{ cm}^3$ . Durch Beobachtung des zeitlichen Ganges der von diesem Thermometer aufgenommenen Temperatur konnten Anhaltspunkte über die thermische Schwadigkeit im Versuchsraum gewonnen werden. Es ergab sich, daß die Schwankungen ganz unbedeutend sind, solange der Expansionsvorgang einigermaßen adiabatisch verläuft. Wenn sich nach längerer Expansion schließlich eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Versuchsraum und Kesselwänden einstellt, werden sie hingegen merklich. Ihre Amplitude liegt aber auch dabei meist unter  $0,5^\circ$ . Die Temperaturschwadigkeit dürfte danach für die Beurteilung der im folgenden Abschnitt mitgeteilten Ergebnisse keine Rolle spielen.

Die Wolkenbildung im Versuchsraum wird durch ein seitlich angebrachtes, kreisrundes Glasfenster beobachtet, das 10 cm lichten Durchmesser hat und beidäugiges Beobachten gestattet. Es ist unschwer möglich, die einzelnen Wolkenelemente im Versuchsraum mit unbewaffnetem Auge zu erkennen. Dabei muß allerdings die Beleuchtung sorgfältig eingestellt werden, denn von der Aluminiumfolie gehen leicht störende Reflexe aus. Die Beleuchtungsanordnung wurde im Laufe der Untersuchungen mehrfach verändert und damit den verschiedenen Beobachtern angepaßt. Zuletzt bewährte sich ein verhältnismäßig schwaches Lichtstrahlenbündel, das von einer 35-Watt-Lampe erzeugt wird und den Versuchsraum senkrecht zum Sehstrahl durchmißt. Bei dieser Anordnung ist die Bildung der Wassertropfen im Versuchsraum nur schwach erkennbar, dagegen treten die Eisteilchen, auf die es bei den Untersuchungen ja viel mehr ankommt, deutlich hervor. Wenn schräg gegen die Lichtquelle beobachtet wird, sind die Wassertropfen zwar wesentlich besser sichtbar, überdecken aber u. U. die dazwischen befindlichen Eisteilchen. Besonders bei dichter Wolkenbildung ist das leicht möglich; es ist daher übrigens im allgemeinen vorteilhafter, mit geringen Wolkenichten zu arbeiten, also mit niedrigen Ausgangsdampfdrücken und geringen nachgeahmten Wolkenmächtigkeiten, die sich mit der Apparatur ohnehin besser naturgetreu nachbilden lassen.

Die Unterscheidung von Wassertropfen und Eisteilchen macht weit weniger Schwierigkeiten, als man anfangs annehmen könnte. Die Eisteilchen zeichnen sich schon kurze Zeit nach ihrer Entstehung durch ihre Größe, die sie infolge ihrer relativ hohen Wachstumsgeschwindigkeit schnell erreichen, zweifelsfrei vor den gleichzeitig im Raum befindlichen Wassertropfen aus. Die von den einzelnen Eisteilchen reflektierte Lichtmenge ist daher und überdies wegen des Einflusses der Beleuchtungseinrichtung unverkennbar größer als bei den benachbarten Tropfen. Ferner können die Eisteilchen meist an ihrer höheren Fallgeschwindigkeit erkannt werden. Ein untrügliches Erkennungszeichen ist schließlich das „Flimmern“, das durch wechselnde Lichtreflexion an den pendelnden Eisteilchen entsteht.

Das Flimmern ist zwar von der Form der Teilchen abhängig, insbesondere davon, ob Vollkristalle oder Skelette vorhanden sind, ermöglicht aber gerade in den Fällen die Entscheidung, in denen sich die Eisteilchen allein im Raum befinden und ein Vergleich mit benachbarten Wassertropfen nicht möglich ist; denn gerade bei den geringen Eisübersättigungen, die bei Ab-

wesenheit von Wassertropfen möglich sind, bilden sich Vollkristalle aus<sup>1)</sup>, die deutlich flimmern.

Das Photographieren der im Versuchsraum suspendierten Wolkenelemente ist nicht versucht worden, da von einer früheren Arbeit her<sup>2)</sup> bekannt war, mit welcher großen Schwierigkeiten das verbunden ist. Die objektive Bestimmung der Zahl der Elemente pro Raumeinheit, die auf diese Weise möglich gewesen wäre, konnte nur durch Schätzungen ersetzt werden. Tatsächlich reichen diese Schätzungen zunächst einmal für die Bestimmung der vorher ganz unbekanntesten Größenordnungen aus. Bei den Teilchenzahl-schätzungen wird das Volumen des betrachteten, ausgeleuchteten Raumes zugrunde gelegt. In vielen Fällen befinden sich nur einige Eisteilchen in diesem Raume. Man könnte versuchen, die in der Apparatur künstlich erzeugten Eisteilchen mit Hilfe einer besonderen Vorrichtung aufzufangen und zum Zwecke der Formbestimmung zu photographieren. Derartige Versuche wurden bisher nicht unternommen, da die Frage der Teilchenform für die Meteorologie vorerst weit weniger bedeutungsvoll erschien als die anderen hier behandelten Fragen, die mit der Eisteilchenentstehung zusammenhängen.

### 3. Ergebnisse

#### a) Allgemeine Beobachtungen über die Bildung von Wasserwolken, Mischwolken und Eiswolken im Versuchsraum

Die allgemeinen Beobachtungen über den Verlauf der künstlichen Wolkenbildung im Versuchsraum entsprechen ganz den bekannten Erscheinungsformen der atmosphärischen Quellwolken und besonders auch den in Abschnitt B 2 mitgeteilten, bei Flügen gewonnenen Beobachtungsergebnissen.

Auch bei den künstlichen Quellwolken wird, von bestimmten Ausnahmen abgesehen, zuerst die Wassertropfenbildung sichtbar und beherrscht das Gesamtbild. Beim Beginn der Kondensation treten Farberscheinungen im Lichtstrahlbündel auf, die in bekannter Weise durch Beugung an den zunächst sehr kleinen Tropfen entstehen. Die Farberscheinungen verschwinden nach etwa 3 bis 10 Sekunden, und es werden, falls die Beleuchtungsrichtung hierfür günstig gewählt wurde, allmählich die einzelnen, zahlreich im Raum vorhandenen Tropfen erkennbar. Größenunterschiede der Tropfen kann man dabei nicht feststellen.

Das Bild bleibt zunächst unverändert, wenn im Versuchsraum Temperaturen von einigen Grad unter Null erreicht werden. Bei bestimmten tieferen Temperaturen erscheinen jedoch zwischen den Wassertropfen einige Eisteilchen, die in der in Abschnitt C 2 geschilderten Weise deutlich hervortreten. Es gelingt somit die künstliche Eisteilchenbildung im Laboratorium; sie wurde erstmals am 29. 7. 1938 in Friedrichshafen von Findeisen im Beisein von W. Peppler beobachtet.

Sofern die kritische Temperatur nach der im Abschnitt A gegebenen Definition nur wenig unterschritten wird, ist die Zahl der Eisteilchen so gering, daß in dem ausgeleuchteten Raum nur im Abstand von Sekunden eines oder mehrere sichtbar werden. Man muß ständig sehr aufmerksam beobachten, um die Eisteilchen nicht zu übersehen. Bei weitergehender Temperaturerniedrigung werden die Eisteilchen wesentlich zahlreicher, erreichen aber auch bei Temperaturen von  $-40^{\circ}$  noch nicht annähernd die Zahl der im gleichen Raum entstandenen Wassertropfen.

Bei manchen Versuchen, bei denen nur mäßig tiefe Temperaturen erzeugt werden und daher die Eisteilchenzahl im allgemeinen nur gering ist, zeigen sich gelegentlich Eisteilchenschwärme von etwa 10 bis 20 Stück, die auf einen verhältnismäßig engen Raum konzentriert sind. Es entsteht der Eindruck, daß alle Teilchen eines solchen Schwarmes einen gemeinsamen Ursprung haben und sekundär von einem einzigen Teilchen aus gebildet worden sind, vielleicht als Splitter.

Wenn die Temperaturerniedrigung im Versuchsraum gestoppt wird, bilden sich offenbar keine weiteren Eisteilchen mehr. Falls bis dahin nur wenige Eisteilchen entstanden sind, verschwinden diese innerhalb einer Zeitspanne von weniger als einer Minute durch Ausfallen, und es bleiben von der Wolke nur die Wassertropfen zurück. Ein anderer Verlauf ergibt sich, wenn sich bereits viele Eisteilchen im Raume befinden. Die Teilchen wachsen dann nicht so stark, und ihre Fallgeschwindigkeit bleibt dementsprechend gering. Sie halten sich infolgedessen so lange im Raum, daß sie vermöge des Dampfdruckunterschiedes, der bekanntlich zwischen Wasser- und Eisoberfläche herrscht, die Wassertropfen allmählich ganz aufzehren. Auf diese Weise bleiben nur noch Eisteilchen im Raum übrig. Das Verschwinden der Tropfen findet beschleunigt statt, wenn die Temperatur im Versuchsraum steigt; die Eisteilchen überdauern auch in diesem Falle die Wassertropfen. Wenn jedoch der adiabatische Vorgang mit genügender Geschwindigkeit wiedereinsetzt, tritt neben den Eisteilchen erneut Wassertropfenbildung ein, auch dann, wenn vorher schon alle Tropfen verschwunden waren.

Alle diese Erscheinungen stimmen mit den schon früher<sup>1)</sup> besprochenen und ausführlich gedeuteten Vorgängen bei der Wolkenbildung in der Atmosphäre völlig überein. Beim Quellvorgang bilden sich normalerweise Mischwolken aus Wasserwolken und die Mischwolken gehen je nach den gegebenen Bedingungen entweder in Eiswolken oder wieder in Wasserwolken über; es ist aber auch „sekundäre“ Mischwolkenbildung möglich. Die Reihenfolge Wasserwolken-Mischwolken bei der Wolkenentstehung ist immer dann gegeben, wenn die Temperatur im Kondensationsniveau höher ist als die kritische Temperatur, also unter sommerlichen Verhältnissen, bei denen die Quellwolkenvorgänge ja am häufigsten sind.

Wenn die Temperatur im Kondensationsniveau tiefer ist als die kritische Temperatur, verläuft die Wolkenbildung anders. Das kann aber nur durch sehr sorgfältige, systematische Beobachtungen festgestellt werden. Bei genügend tiefen Temperaturen werden die Eisteilchen schon gleich nach Beginn der Wolkenbildung im Versuchskessel sichtbar, jedoch wird auch hierbei das allgemeine Bild der Wolke von der großen Wassertropfenmenge beherrscht, die gleichzeitig in Erscheinung tritt. Soweit man beobachten kann, führt die normale Nachahmung des Quellvorganges bei genügend tiefen Temperaturen hiernach stets zuerst zu einer Mischwolke. Das entspricht der Erscheinungsform der Cirrocumuli oder hoher Altocumuli in der Atmosphäre.

Die Beobachtungen lassen zunächst die Frage offen, ob die Entstehung der Eisteilchen an die Entstehung von Wassertropfen gebunden ist oder nicht, d. h. ob die Eisteilchen durch Gefrieren von Wassertropfen oder unmittelbar durch Sublimation (Übergang: Wasserdampf  $\rightarrow$  Eis) an den Sublimationskernen gebildet werden. Im Falle der unmittelbaren Sublimation müßten die Eisteilchen unter den genannten Bedin-

<sup>1)</sup> A. und K. Wegener, Physik d. Atmosphäre, Leipzig, 1935; W. Findeisen, Meteor. Z. 56, 429 (1939); W. Kleber, Meteor. Z. 60, 243 (1943).

<sup>2)</sup> W. Findeisen, Gerl. Beitr. Z. Geophys. 35, 295 (1932).

<sup>1)</sup> W. Findeisen, Meteor. Z. 57, 201 (1940); W. u. E. Findeisen, ebenda 60, 145 (1943).

gungen kurz vor den Wassertropfen entstehen. Bei normalen Quellvorgängen kann aber diese Reihenfolge nicht beobachtet werden, nämlich schon deshalb nicht, weil die Eisteilchen in der kurzen Zeit, in der ihr Vorhandensein vor dem Beginn der Tropfenbildung thermodynamisch möglich ist, noch nicht bis zur Sichtbarkeitsgröße wachsen können. Das gilt nicht nur für das Experiment, sondern ebenso für den atmosphärischen Vorgang. Man darf auch nicht erwarten, die entstandenen Eisteilchen könnten so viel Wasserdampf aufnehmen, daß die zur Wassertropfenbildung nötige relative Feuchte im Raum nicht mehr erreicht wird; wie sich theoretisch ergibt, wird das Ansteigen der relativen Feuchte durch das Vorhandensein der Eisteilchen nicht merklich aufgehalten, sogar bei verhältnismäßig sehr geringen Vertikalgeschwindigkeiten noch nicht genügend. Bei allen Quellvorgängen, bei denen die Temperatur im Kondensationsniveau unter der kritischen Temperatur liegt, werden dem Beobachter daher zunächst immer nur Mischwolken sichtbar; die Reihenfolge der Entstehung der Wassertropfen und Eisteilchen muß dabei ohne Einfluß bleiben.

Die Frage der Reihenfolge, der übrigens hiernach meteorologisch nur verhältnismäßig untergeordnete Bedeutung zukommt, die aber in der Literatur eifrig erörtert worden ist, wurde durch besondere Versuche studiert. Bei diesen Versuchen wurde der adiabatische Vorgang im Versuchsraum jeweils möglichst kurz vor Erreichen des Kondensationspunktes abgebrochen, so daß die Tropfenbildung verhindert, aber dennoch eine möglichst hohe Eisübersättigung erzeugt wurde, die theoretisch zur Eisteilchenbildung durch Sublimation an den Sublimationskernen ausreichen konnte. Es war recht schwierig, den richtigen Zeitpunkt und damit die richtige Temperatur für das Unterbrechen des Expansionsvorganges zu treffen. Die optimale Temperatur darf einerseits keinesfalls unterschritten werden, andererseits ist, wie man sich auf Grund der weiter unten mitgeteilten Ergebnisse überlegen kann, eine Annäherung an die optimale Temperatur bis auf mindestens etwa  $0,5$  bis  $1^\circ$  erforderlich, um die für die Eisteilchenbildung nötige Eisübersättigungen zu erzielen. Da keine Möglichkeit bestand, die Feuchte im Versuchsraum zu verfolgen oder auch nur zu Beginn des Expansionsvorganges zu messen und dementsprechend die optimale Temperatur vorzuberechnen, mußten die Versuche empirisch durchgeführt werden; auf diese Weise gelangen 12 von 79 Versuchen. Bei diesen 12 Versuchen konnte nun tatsächlich beobachtet werden, daß im Versuchsraum Eisteilchenbildung eintrat, ohne daß vorher irgendeine Wassertropfenbildung sichtbar war. Die Eiswolkenbildung ist hiernach primär, ohne den Umweg über die Mischwolkenbildung erfolgt, und die Eisteilchen sind demzufolge selbständig, ohne den Umweg über sichtbare Wassertropfen entstanden. Diesem Untersuchungsergebnis über die Reihenfolge bei der Entstehung der flüssigen und festen Phase des Wassers in den Wolken bei tiefen Temperaturen entsprechen auch die Ergebnisse anderer Versuche, wie unten in Abschnitt C 3 c a mitgeteilt wird.

#### b) Das Sublimationskernspektrum

Die beschriebenen Beobachtungen aus der Atmosphäre und aus dem Laboratorium, nach denen sich unter sonst gleichen Bedingungen um so mehr Eisteilchen in einem Luftvolumen bilden, je tiefer die Temperatur ist, legen den Schluß nahe, daß die Eisteilchenbildung auf der Wirksamkeit bestimmter Kerne beruht, von denen manche leichter, manche schwerer die Entstehung von Eisteilchen ermöglichen. Diese

Kerne sind nach den Beobachtungen in viel geringerer Zahl in der Luft vorhanden als die Kondensationskerne und haben offenbar besondere Eigenschaften. Zur daher notwendigen Unterscheidung von den Kondensationskernen wurden sie schon in den früheren Arbeiten<sup>2)</sup> „Sublimationskerne“ genannt.

Ein Maß für die mehr oder weniger gute Eignung der Sublimationskerne gibt diejenige Temperatur, bei der die Kerne die Eisteilchenbildung ermöglichen, wenn sie sich innerhalb von Wasserwolken befinden. Dieses Maß ist zweifellos das für den Meteorologen praktisch brauchbarste; es wurde deshalb, und weil es mit keiner Hypothese hinsichtlich des Mechanismus der Eisteilchenbildung verbunden ist, bei den Untersuchungen von Anfang an benutzt. Obwohl die späteren, in den folgenden Abschnitten beschriebenen Untersuchungen ergaben, daß die unterschiedlichen Feuchteverhältnisse in den verschiedenen Wasserwolken von bedeutendem Einfluß auf die Eisteilchenbildung sind, kann das Temperaturmaß für die Eignung der Sublimationskerne auch weiter beibehalten werden.

Der Gehalt einer Luftmenge an Sublimationskernen läßt sich mit der Temperatur als Abszisse und der Zahl derjenigen Kerne, die bei den verschiedenen Temperaturen in Wasserwolken wirksam werden können, als Ordinate in Form einer Eignungsverteilung anschaulich darstellen; diese Verteilung wird „Sublimationskernspektrum“ genannt.

Das Sublimationskernspektrum wurde mit Hilfe der Quellwolkenapparatur ermittelt, indem nacheinander Quellwolken mit verschiedenen Tiefsttemperaturen erzeugt wurden. Dabei wurde jeweils die Zahl der pro Raumeinheit entstandenen Eisteilchen geschätzt. Genauere Zahlbestimmungen waren wegen der großen Unterschiede, die sich ergaben, vorerst nicht erforderlich.

Die Untersuchungen zeigten, daß die Zahl der wirksam werdenden Kerne in dem Temperaturbereich von etwa  $-5$  bis  $-40^\circ$  um mehrere Zehnerpotenzen ansteigt. Die Eisteilchenbildung beginnt bei Temperaturen zwischen  $-6$  und  $-20^\circ$  mit sehr geringen Teilchenzahlen, zuerst etwa nur 1 pro Kubikmeter. Von da ab wächst die Zahl der wirksam werdenden Kerne nach tieferen Temperaturen zu anscheinend ständig an. Ab etwa  $-30^\circ$  erfolgt ziemlich unvermittelt eine sehr starke Zunahme von der Größenordnung 1 pro Liter auf die Größenordnung 1 pro Kubikzentimeter. Der Beobachter erhält den Eindruck, daß hier eine neue Art von Kernen wirksam wird. Es werden demgemäß, vor allem mit Rücksicht auf die meteorologische Bedeutung der hohen Kernzahlzunahme, zwei Arten von Sublimationskernen unterschieden, die Kerne 1. Art und 2. Art. Die Sublimationskerne 1. Art zeichnen sich durch ihre gute Eignung zur Eisteilchenbildung aus, die Kerne 2. Art durch ihre verhältnismäßig hohe Zahl.

Die Untersuchungen zeigten ferner, daß bei verschiedenen Versuchsreihen an verschiedenen Tagen starke Unterschiede in der Zahl der gebildeten Eisteilchen auftreten. Wie bei den im nächsten Abschnitt beschriebenen Messungen festgestellt wurde, beruhen diese Unterschiede nicht allein auf Schwankungen des Gehaltes der Luft an geeigneten Sublimationskernen, sondern ganz wesentlich auch auf ungleicher Wahl der nachgeahmten Vertikalgeschwindigkeiten.

Durch Abb. 3 wird vorerst nur etwa der mittlere Verlauf des Sublimationskernspektrums in logarithmischer Darstellung veranschaulicht. Die beiden Kernarten treten trotz des logarithmischen Maßstabes deutlich voneinander abgegrenzt hervor. Man kann neben

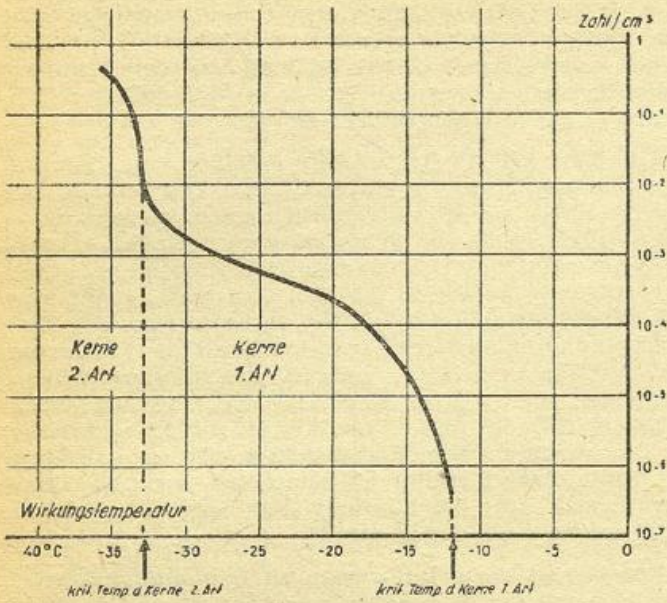


Abb. 3

Mittlerer Verlauf des Sublimationskernspektrums

der kritischen Temperatur für die Kerne 1. Art, die der in Abb. 1 gegebenen Definition entspricht, auch eine kritische Temperatur der Kerne 2. Art festlegen. Sie ist nicht weniger scharf ausgeprägt als die kritische Temperatur der Kerne 1. Art und ebenfalls von hoher meteorologischer Bedeutung, weil sie für die Entstehung sehr zahlreicher Eisteilchen maßgebend ist.

**c) Abhängigkeit der kritischen Temperaturen von der Vertikalgeschwindigkeit der Quellwolken**

Untersuchungen über die Abhängigkeit der kritischen Temperaturen von der nachgeahmten Vertikalgeschwindigkeit führten sowohl hinsichtlich meteorologischer Fragen als auch hinsichtlich der Frage des Mechanismus der Eisteilchenbildung zu interessanten Ergebnissen.

Zu den Untersuchungen waren viele Einzelversuche nötig, insgesamt 460, bei denen mit schrittweise veränderten Tiefsttemperaturen und reihenweise veränderten Vertikalgeschwindigkeiten immer wieder beobachtet wurde, ob Eisteilchenbildung an Kernen 1. Art bzw. 2. Art eintrat oder nicht. Jeweils der niedrigste Wert der Tiefsttemperatur, bei dem die Eisteilchenbildung noch ausblieb, und der höchste Wert, bei dem die Eisteilchenbildung noch stattfand, wurden notiert. Die Lage der kritischen Temperatur bei den verschiedenen Vertikalgeschwindigkeiten wurden auf diese Weise durch Einengung ermittelt.

Nacheinander durchgeführte Versuchsreihen, bei denen die Vertikalgeschwindigkeiten 5, 9, 13, 17 und 22 m/sec nachgeahmt wurden, erbrachten das Ergebnis, daß die kritischen Temperaturen beider Kernarten sehr beträchtlich von der Vertikalgeschwindigkeit abhängen.

**a) Bei den Sublimationskernen 1. Art**

Abb. 4 zeigt diese Abhängigkeit für die kritische Temperatur der Kerne 1. Art und veranschaulicht zugleich die Bestimmungsmethode. Die kritische Temperatur sinkt danach bei steigender Vertikalgeschwindigkeit. In schnell aufsteigenden Quellwolken beginnt die Eisteilchenbildung bei gleichem Kerngehalt der Luft erst bei mindestens um etwa 10° tieferen Temperaturen als in langsam aufsteigenden Wolken.

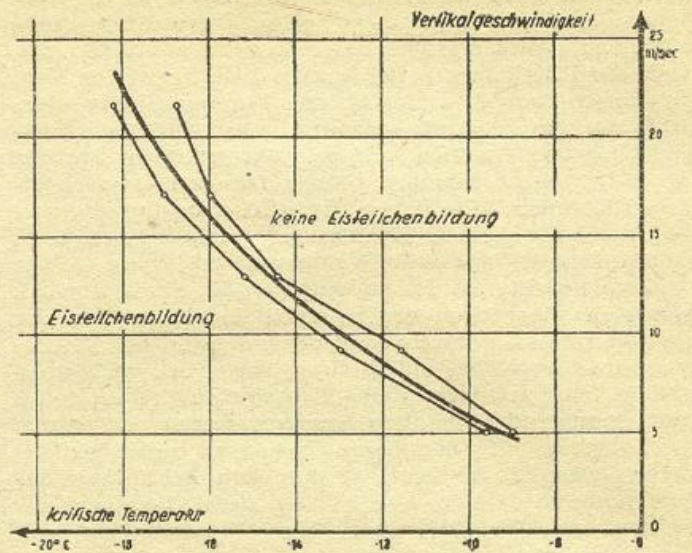


Abb. 4

Beispiel für die Ermittlung der Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Sublimationskerne 1. Art von der Vertikalgeschwindigkeit

Die Versuche wurden an verschiedenen Tagen wiederholt. Die Ergebnisse von 13 Versuchstagen sind in Abb. 5 zusammengestellt. Alle Kurven zeigen ungefähr die gleiche Abhängigkeit. Die Streuung der Kurven wird wohl zum Teil durch Unsicherheiten bei der Bestimmung, hauptsächlich aber anscheinend durch Schwankungen des Kerngehaltes der Luft verursacht. Die kritischen Temperaturen schwanken danach bei gleichbleibender Vertikalgeschwindigkeit um etwa 2°. Diese Veränderlichkeit erscheint zunächst geringfügig gegenüber der Schwankung der Zahl der Kerne, die nach den bisherigen Beobachtungen etwa 500% erreicht; wie aus Abb. 7 abgeleitet werden kann, bedeuten aber beide Veränderlichkeiten etwa dasselbe.

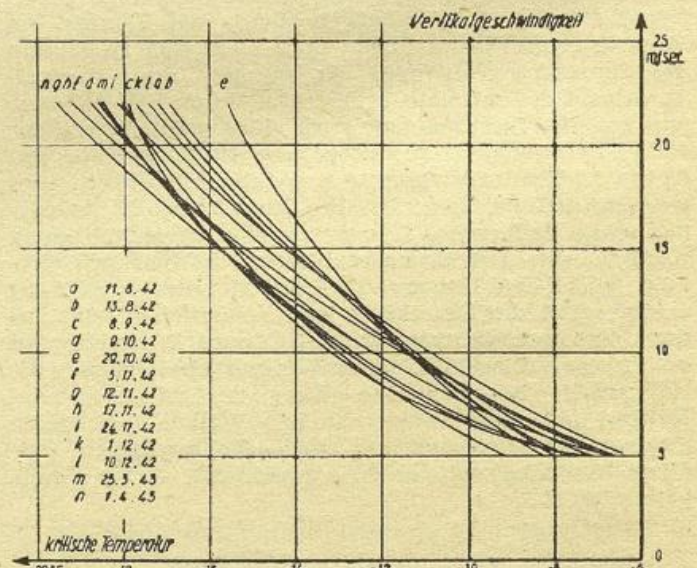


Abb. 5

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse über die Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Sublimationskerne 1. Art von der Vertikalgeschwindigkeit

Der Nachweis des Sinkens der kritischen Temperatur bei steigender Vertikalgeschwindigkeit bringt eine schöne Erklärung für die im Abschnitt B 2 mitgeteilten, in der Atmosphäre gewonnenen Beobachtungen.

Der in Abschnitt B 2 angegebene Extremwert der kritischen Temperatur von  $-19$  bis  $-20^\circ$  ist in schnell aufsteigenden, sommerlichen Quellwolken beobachtet worden, in denen die Vertikalgeschwindigkeit tatsächlich etwa  $25$  m/sec betragen haben mag, wie Abb. 9 entspricht. Ebenso wird der andere Extremwert von  $-6^\circ$  oder höher nun verständlich, denn dieser Wert wurde in einer Schichtwolke beobachtet, für die natürlich nur eine sehr geringe Vertikalgeschwindigkeit einzusetzen ist und demgemäß nach Abb. 9 die kritische Temperatur tatsächlich nur etwa  $-5^\circ$  bis  $-6^\circ$  beträgt. Ferner ist der Unterschied, der zwischen den mittleren kritischen Temperaturen einerseits über Land und andererseits über See ergab, jetzt leichter zu verstehen. Er beruht auf der Tatsache, daß aus bekannten thermodynamischen Gründen über Land höhere Vertikalgeschwindigkeiten in den Wolken herrschen als über See. Nach allem besteht eine denkbar gute Übereinstimmung zwischen Natur und Experiment. Um aus den Untersuchungsergebnissen auf den Mechanismus der Eisteilchenbildung schließen zu können, wurden sie durch die beiden folgenden Feststellungen erweitert:

1. Durch Versuche, bei denen die nachgeahmte Vertikalgeschwindigkeit im Laufe des Wolkenbildungsvorganges verändert wurde, konnte festgestellt werden, daß der sich jeweils ergebende Wert der kritischen Temperatur derjenigen Vertikalgeschwindigkeit entspricht, die im Augenblick des Kondensationsbeginns herrschte. Wenn also bei einem Versuche zunächst eine hohe Vertikalgeschwindigkeit eingestellt wurde, so ergab sich auch dann gemäß Abb. 5 ein entsprechend tiefer Wert der kritischen Temperatur, wenn nach Beginn der Tropfenbildung die Vertikalgeschwindigkeit stark erniedrigt wurde. Bei allen Versuchen, die in diesem Zusammenhang durchgeführt wurden, fand die Kondensation immer schon bei Temperaturen statt, bei denen bestimmt noch keine Eisteilchenbildung eintrat. Es wurde also festgestellt, daß der Verlauf des Kondensationsvorganges von maßgeblichem Einfluß auf die spätere Eisteilchenbildung ist.

2. Die Versuche mit veränderlicher Vertikalgeschwindigkeit erlauben ferner die im Anschluß an theoretische Diskussionen nötige Feststellung, das die „Verweilzeit“, d. h. diejenige Zeit, während der in dem untersuchten Luftvolumen jeweils die Tiefsttemperatur erhalten bleibt, nicht von merklichem Einfluß auf die kritische Temperatur ist. Das kann eigentlich schon aus der starken Verschiedenheit der kritischen Temperaturen bei den verschiedenen Vertikalgeschwindigkeiten abgeleitet werden, wird aber zweifelsfrei klar, nachdem die Versuche mit gleicher End-Vertikalgeschwindigkeit zu ganz verschiedenen kritischen Temperaturen führten, wenn nur die Anfangs-Vertikalgeschwindigkeit dementsprechend verschieden waren.

Die Abhängigkeit der kritischen Temperatur von der Vertikalgeschwindigkeit ist danach (wie im Anschluß an theoretische Betrachtungen in einer folgenden Arbeit gesondert und ausführlich besprochen werden soll) so zu erklären, daß bei hohen Vertikalgeschwindigkeiten infolge der dabei im Kondensationsniveau auftretenden hohen Wasserdampfübersättigungen ein Teil der Sublimationskerne zur Tropfenbildung herangezogen wird und dadurch bemerkenswerterweise für die folgende Eisteilchenbildung nicht mehr zur Verfügung steht. Die mitgeteilten Versuchsergebnisse stellen somit eine beachtliche Stütze für die Anschauung dar, nach der die Eisteilchen nicht durch Gefrieren von Tropfen, sondern durch Sublimation an besonderen Kernen entstehen.

### β) Bei den Sublimationskernen 2. Art

Für die kritische Temperatur der Sublimationskerne 2. Art wurden die Versuche in gleicher Weise durch-

geführt wie bei den Sublimationskernen 1. Art. Abb. 6 zeigt in einem Beispiel, wie auch hier die Abhängigkeit der kritischen Temperatur von der Vertikalgeschwindigkeit ermittelt wurde. In Abb. 7 sind Ergebnisse von 7 Versuchstagen zusammengestellt.

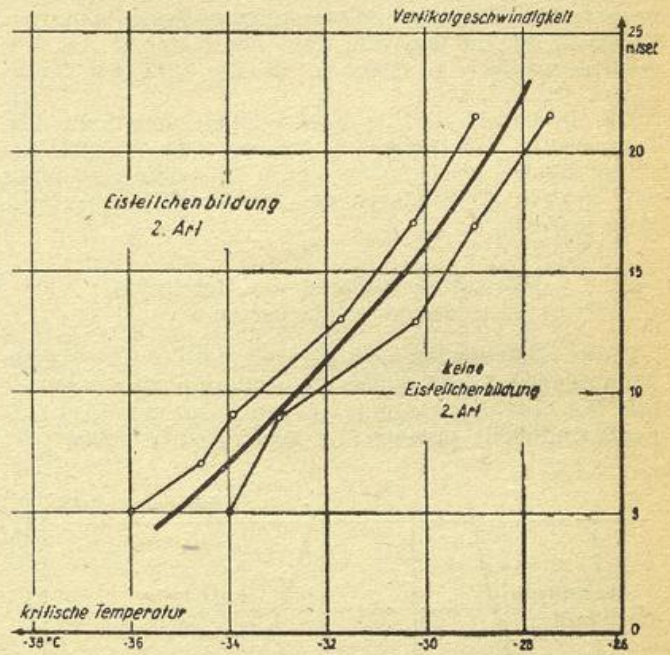


Abb. 6

Beispiel für die Ermittlung der Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Sublimationskerne 2. Art von der Vertikalgeschwindigkeit

Aus den Darstellungen geht hervor, daß bei den Sublimationskernen 2. Art eine Abhängigkeit im umgekehrten Sinne besteht wie bei den Sublimationskernen 1. Art. Bei den Kernen 2. Art steigt die kritische Temperatur mit der Vertikalgeschwindigkeit. Dabei ist die Veränderlichkeit der kritischen Temperatur nicht so groß wie bei den Kernen 1. Art. Bei geringen Vertikalgeschwindigkeiten beträgt die kri-

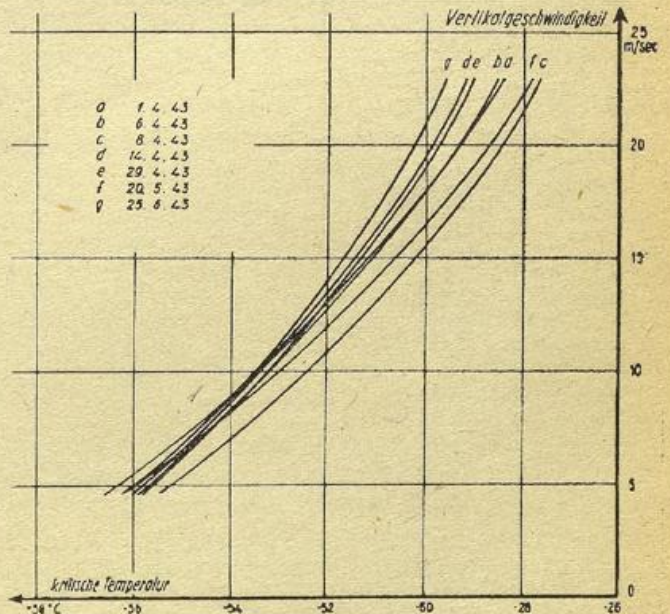


Abb. 7

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse über die Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Sublimationskerne 2. Art von der Vertikalgeschwindigkeit

tische Temperatur der Kerne 2. Art etwa  $-36^{\circ}$  und geht wahrscheinlich herunter bis auf  $-38^{\circ}$ ; bei 20 m/sec erreicht sie dagegen  $-29^{\circ}$ .

Die Kurven der Abb. 11 zeigen geringere Streuung als diejenigen der Abb. 9. Die Streuung in Abb. 11 wird wahrscheinlich nur durch die Ungenauigkeiten verursacht, die der Bestimmungsmethode anhaften. Übrigens scheint auch die Zahl der Kerne 2. Art wesentlich weniger zu streuen als die Zahl der Kerne 1. Art.

Die Erklärung für die Abhängigkeit der kritischen Temperatur der Kerne 2. Art von der Vertikalgeschwindigkeit wird später, nach Mitteilung weiterer, mit anderen Apparaturen gewonnener Versuchsergebnisse gegeben.

**γ) Zusammenstellung der Ergebnisse für beide Kernarten**

Durch Übertragung der Kurven, die sich aus den Abbildungen 5 und 7 für die mittleren Abhängigkeiten der kritischen Temperaturen von der Vertikalgeschwindigkeit ergeben, ist Abb. 8 entstanden. Sie

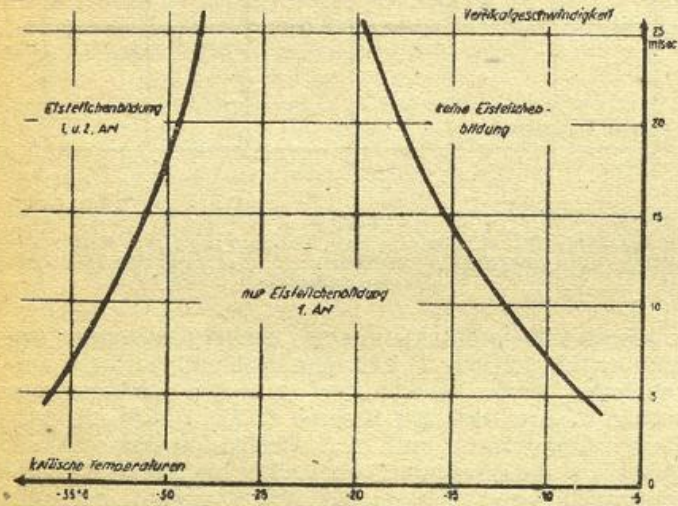


Abb. 8

Mittlerer Verlauf der kritischen Temperaturen in Abhängigkeit von der Vertikalgeschwindigkeit

veranschaulicht, daß der Unterschied der beiden kritischen Temperaturen bei geringen Vertikalgeschwindigkeiten am größten ist und wahrscheinlich etwa  $35^{\circ}$  erreicht. Nach hohen Vertikalgeschwindigkeiten zu verringert er sich stark; bei 25 m/sec beträgt er nur noch  $9^{\circ}$ .

Daraus ergibt sich eine von der Vertikalgeschwindigkeit abhängige Verzerrung des Sublimationskernspektrums. In Abb. 9 sind im Anschluß an Abb. 3, die zunächst nur eine mittlere Verteilung zeigte, die Verteilungskurven für die Vertikalgeschwindigkeiten 5 und 20 m/sec dargestellt. Wie schon oben erwähnt, können die Kurven infolge der Ungenauigkeit der zugrundeliegenden Teilchenzahlen-Schätzungen vorläufig nur einen rohen Überblick über die Verhältnisse geben. Zur genaueren Bestimmung der Verteilungskurven und vor allem zur Klärung der zahlreichen übrigen, mit dem Problem der Eisteilchenbildung zusammenhängenden Fragen, können erst die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen verhelfen.

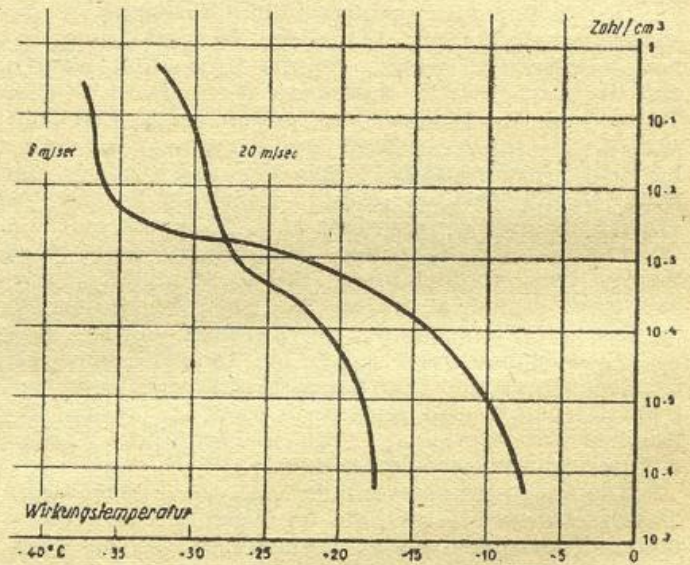


Abb. 9

Sublimationskernspektrum für die Vertikalgeschwindigkeiten 5 m/sec und 20 m/sec