

Sonderdruck von Heft 44
der Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung

Die Entstehung von Eisnebel
aus den Auspuffgasen von Flugmotoren
von Ernst Schmidt

Der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
vorgetragen
am 15. März 1940

Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren

Von Ernst Schmidt

Die Bedingungen für die Eisnebelbildung durch die Auspuffgase in einer stabilen, nicht übersättigten Atmosphäre werden untersucht. Mit Hilfe eines i, x -Diagrammes für niedere Temperaturen und Drücke wird gezeigt, bei welchen atmosphärischen Zuständen in verschiedenen Höhen Eisnebelbildung zu erwarten ist. Dabei ergibt sich, daß die Art des Brennstoffes von wesentlichem Einfluß ist. Zum Schluß werden die möglichen Maßnahmen zur Bekämpfung der Eisnebelbildung besprochen.

I. Einleitung

Bekanntlich beobachtet man hinter Flugzeugen in großen Höhen manchmal die Bildung eines Nebelstreifens, der in einiger Entfernung wieder verschwindet. Bei klarem Wetter ist diese hell beleuchtete Nebelfahne für Kriegsflugzeuge sehr unbequem, weil sie das Auffinden und die Bekämpfung erleichtert. Da diese Erscheinung nur in großer Höhe bei Temperaturen unter 0° auftritt, muß der Nebel ebenso wie die hohen Cirruswolken aus Eispartikelchen oder aus unterkühlten Wassertröpfchen bestehen. Im folgenden sollen die Bedingungen für das Entstehen und Wiederverschwinden solcher Eisnebelfahnen hinter Flugzeugen untersucht werden¹⁾.

Gelegentlich kommt es auch vor, und zwar schon in geringeren Höhen, daß der von einem Flugzeug hervorgerufene Nebelstreifen sich dauernd vergrößert und zu einer Wolkenbank auswächst. Dann muß in der Atmosphäre ein Zustand der Übersättigung geherrscht haben, und das Flug-

¹⁾ Versuchshöhenflüge der Deutschen Forschungsanstalt für Segelflug (vgl. ZWB Forschungsbericht Nr. 1134) und die von Herrn Georgii gestellte Frage, ob sich die Eisnebelbildung durch künstliche Trocknung der Abgase bekämpfen lasse, gaben die Anregung zu dieser Arbeit.

zeug war nur die Ursache für die Beseitigung dieser Instabilität. Die Eisnebelbildung wird in diesem Falle nur ausgelöst durch die in den Auspuffgasen enthaltenen Kerne und Ionen, ohne daß die Auspuffgase selbst Wasserdampf zu enthalten brauchen.

Wir wollen uns hier aber mit dem ersten Fall beschäftigen, bei dem der Eisnebel in einer stabilen, also nicht übersättigten Atmosphäre aus dem in den Auspuffgasen enthaltenen Wasserdampf entsteht.

II. Der Wasserdampfgehalt und die Enthalpie der Abgase

Alle flüssigen Brennstoffe bestehen im wesentlichen aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Ihre Verbrennungsgase enthalten daher je nach der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes mehr oder weniger Wasser-

Brennstoff	Zusammensetzung		Wasserdampfgehalt des Abgases bezogen auf			Heizwert bezogen auf	
	Formel	C in Gew. T.	Abgasmenge $\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$	Luftäquivalent des trockenen Abgases		Brennstoff-Gew. H_u $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	Luftäquiv. trocken. Abgases Φ_u $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$
				n $\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}}$	x $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$		
Kohle	C	1,00	0,0	0,0	0,0	8 000	696
Benzol	$C_6 H_6$	0,92	0,081	0,088	0,055	9 590	749
Toluol	$C_7 H_8$	0,91	0,089	0,098	0,061	9 750	756
Benzin, Dieselöl	85% C	0,85	0,135	0,157	0,097	10 240	740
Propan	$C_3 H_8$	0,82	0,154	0,182	0,113	11 060	771
Äther	$C_4 H_{10} O$	0,65	0,158	0,188	0,117	8 060	772
Äthylalkohol	$C_2 H_6 O$	0,52	0,186	0,229	0,142	6 370	770
Methylalkohol	$C H_4 O$	0,35	0,232	0,302	0,187	4 730	787

Tabelle 1
Wasserdampfgehalt von Abgasen verschiedener Brennstoffe

dampf. Tabelle 1 gibt Zusammensetzung, Heizwert und Wasserdampfgehalt der Abgase bei vollständiger Verbrennung mit der theoretischen Luftmenge für einige Brennstoffe an. In der Tabelle ist n das Molver-

hältnis des Wasserdampfes zum trockenen Teil des Abgases, und x bedeutet die Wasserdampfmenge in kg je kg trockenes Abgas, wobei aber die Kohlendioxidmoleküle durch die gleiche Anzahl Luftmoleküle ersetzt gedacht sind. Für einen schwefelfreien Brennstoff mit dem Kohlenstoffgehalt c , dem Wasserstoffgehalt h , dem Sauerstoffgehalt o und gegebenenfalls dem Wassergehalt w (alles in Gewichtsteilen) gilt dann¹⁾

$$x = \frac{M_w}{M_l} n = \frac{18}{29} \frac{\frac{h}{2} + \frac{w}{18}}{\frac{c}{12} + \frac{79}{21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \right)}, \quad (1)$$

wenn $M_w = 18$ und $M_l = 29$ die Molekulargewichte von Wasser und Luft sind. Dieser kleine Kunstgriff der Einführung einer äquivalenten Luftmenge ändert nichts Wesentliches, er bietet aber den Vorteil, das bekannte für 1 kg Trockenluft aufgestellte i, x -Diagramm der feuchten Luft von Mollier auf unseren Fall anwenden zu können, wenn man es für tiefe Temperaturen und niedere Drücke zeichnet.

Die Gleichung (1) gilt für trockene Luft, bei feuchter Verbrennungsluft mit dem Feuchtigkeitsgehalt x_l hat man zu dem aus Gleichung (1) berechneten Wert von x noch den Betrag x_l/N zu addieren, wobei

$$N = 0,79 + \frac{0,21}{1 + 3 \frac{h}{c} - \frac{3}{8} \frac{o}{c}} \text{ das Molverhältnis des trockenen Abgases}$$

zur trockenen Verbrennungsluft ist. Führt man zur Vereinfachung die Brennstoffkennziffer

$$\sigma = 1 + 3 \frac{h}{c} - \frac{3}{8} \frac{o}{c} \quad (2)$$

ein, so gilt für den Feuchtigkeitsgehalt des Abgases bei feuchter Verbrennungsluft an Stelle von Gleichung (1):

$$x = \frac{18}{29} \frac{6 \frac{h}{c} + \frac{2}{3} \frac{w}{c}}{1 + \frac{79}{21} \sigma} + \frac{x_l}{0,79 + \frac{0,21}{\sigma}}. \quad (1a)$$

¹⁾ Vgl. hierzu z. B. E. Schmidt, Einführung in die technische Thermodynamik, Berlin 1936.

In größeren Höhen der Atmosphäre, wie sie uns hier interessieren, ist x , sehr klein und damit das zweite Glied der Gleichung vernachlässigbar klein gegen das erste.

In ähnlicher Weise muß auch der gewöhnlich auf 1 kg Brennstoff bezogene Heizwert H_u und die Enthalpie der Abgase auf die dem trockenen Abgas äquivalente Luftmenge umgerechnet werden: Aus 1 kg schwefelfreiem Brennstoff entsteht an trockenem Abgas

$$\left[\frac{c}{12} + \frac{79}{21} \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} \right) \right] \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} = \frac{c}{12} \left(1 + \frac{79}{21} \sigma \right) \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \quad (3)$$

oder wenn alle Moleküle des Abgases als Luft mit dem Molekulargewicht $M_l = 29$ angesehen werden, die äquivalente Luftmenge

$$\frac{c}{12} \left(1 + \frac{79}{21} \sigma \right) \cdot 29 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \quad (3a)$$

Damit erhalten wir für den unteren Heizwert bezogen auf die 1 kg trockenem Abgas äquivalente Luftmenge den Ausdruck

$$\mathfrak{H}_u = \frac{12}{c \left(1 + \frac{79}{21} \sigma \right) 29} H_u. \quad (4)$$

Mit dieser Formel sind die Werte in Tabelle 1 berechnet. Die Werte des so definierten Heizwertes \mathfrak{H}_u weichen überraschend wenig voneinander ab, trotzdem die Kraftstoffe sich nach Art und Heizwert je kg erheblich unterscheiden.

Wird der Brennstoff ohne Arbeitsleistung in Luft von 0° unmittelbar verbrannt, so ist der Dampfgehalt x des Abgases durch Gleichung (1) bzw. (1a) gegeben, und die Enthalpie (Wärmeinhalt) des Abgases ebenfalls bezogen auf die 1 kg trockenem Abgas äquivalente Luftmenge ist

$$i = \mathfrak{H}_u + xr. \quad (5)$$

Dabei bedeutet r die Verdampfungswärme des Wassers in kcal/kg, und die Enthalpie ist von 0° und flüssigem Zustand des Wassers an gezählt. Der Heizwert \mathfrak{H}_u ist also gleich der Enthalpiezunahme i_g des Abgases, wenn man diese von 0° und gasförmigem Zustand des Wassers an rechnet.

Ist die Verbrennungsluft kälter als 0° , so vermindert sich die Enthalpie der Abgase um die zum Aufheizen von 1 kg Luft auf 0° erforderliche Wärme, wenn wir von den geringen Unterschieden der spezifischen Wärmen in diesem Temperaturbereich und der Molzahlen von Luft und Abgas absehen.

Man kann diese Korrekturen an Dampfgehalt und Enthalpie der Abgase infolge des Feuchtigkeitsgehaltes und der unter 0° liegenden Anfangstemperatur der Verbrennungsluft ohne Schwierigkeit anbringen; in den uns hier interessierenden Fällen sind sie aber so klein, daß wir davon absehen wollen.

III. Das Molliersche i, x -Diagramm der feuchten Luft

Das gebräuchliche Molliersche i, x -Diagramm¹⁾ ist in der Abbildung 1 dargestellt für Temperaturen oberhalb 0° und für einen konstanten Druck von 1 at = 735,5 mm QS. Darin ist die Enthalpie (Wärmeinhalt) i der feuchten Luft, bestehend aus 1 kg trockener Luft und x kg Wasser über dem Feuchtigkeitsgehalt x aufgetragen, sie wird also nicht — wie sonst üblich — auf 1 kg, sondern auf $(1 + x)$ kg feuchte Luft bezogen. Die Enthalpie ist gleich 0 gesetzt für trockene Luft und flüssiges Wasser von 0° . Um das praktisch wichtige Zustandsgebiet nicht zu sehr zusammenzudrängen, verwendet Mollier ein Achsensystem, bei dem die i -Achse schräg nach rechts unten zeigt, so daß die Isotherme für ein Gemisch aus trockener Luft von 0° und dampfförmigem Wasser von 0° waagrecht verläuft. Die senkrechte Entfernung eines Punktes der schiefen i -Achse von der strichpunktieren Waagerechten durch den Koordinatenursprung entspricht also der Verdampfungswärme $r \cdot x$ der Wassermenge x , wenn $r = 597$ kcal/kg die Verdampfungswärme des Wassers bei 0° ist. Die Waagerechte durch den Koordinatenanfangspunkt bezeichnet dann die Enthalpie von 1 kg trockener Luft von 0° und x kg dampfförmigen Wassers von 0° . Wenn man Wärmemengen von diesem Zustand an zählt, wie es z. B. beim unteren Heizwert der Fall ist, kann man sie unmittelbar von dieser Waagerechten an auftragen.

In das Diagramm sind die Isothermen für verschiedene Temperaturen eingezeichnet. Sie sind im Dampfgebiet oberhalb 0° mit wachsendem Dampfgehalt schwach ansteigende gerade Linien, deren Neigung mit der

¹⁾ Vgl. R. Mollier, Zs. VDI Bd 67 (1923) S. 869 u. Bd 73 (1929) S. 1009, Hütte 26. Aufl. (1931) Bd 1 S. 537 bis 541 sowie Fr. Bosnjakovic, Techn. Thermodynamik, Bd II (1937) S. 30.

Temperatur zunimmt, unterhalb 0° sind sie nach abwärts geneigt, aber so wenig, daß sie in dem schmalen Bereich zwischen der Ordinatenachse und der Grenzkurve praktisch als Waagerechte angesehen werden können. An der Grenzkurve haben die Isothermen einen Knick und verlaufen im Naßdampfgebiet nach Abbildung 1 nahezu parallel zu den Geraden konstanter Enthalpie. Die 0° -Isotherme der feuchten Luft verläuft im Naßdampfgebiet parallel zur Schar der Isenthalpen, mit steigender Temperatur wird die Neigung der Isothermen langsam kleiner. Durch den 0° -Punkt der Sättigungslinie gibt es aber noch eine zweite etwas steilere Isotherme, die für Wasser in festem Zustand gilt. Der schmale Sektor zwischen der Flüssigkeits- und der Eisisotherme für 0° enthält die Zustände, bei denen flüssige Tröpfchen neben Eisnadeln vorkommen.

Die Darstellung im i, x -Diagramm ist besonders geeignet, um Mischungsvorgänge zu untersuchen, denn bei der Mischung addieren sich sowohl die Mengen als auch die Enthalpien, und es läßt sich leicht einsehen, daß alle durch Mischen zweier Mengen mit den Zuständen 1 und 2 erreichbaren Zustände im i, x -Diagramm auf der geraden Verbindungslinie 1 2 liegen müssen. Für die Lage des Mischungspunktes auf dieser Geraden gilt der Schwerpunktsatz, d. h. er teilt die Verbindungslinie im umgekehrten Verhältnis der Mengen 1 und 2.

Wegen der Krümmung der Sättigungslinie kann selbst die Mischung völlig trockener Luft mit feuchter, aber noch nicht gesättigter Luft höherer Temperatur Nebel erzeugen. Als Beispiel ist in Abbildung 1 die Mischung von völlig trockener Luft von 0° (Zustand 1) mit Luft von 50° und $x_2 = 0,07$ (Zustand 2) entsprechend einem Sättigungsgrad $x_2 : x_2' = 0,80$ beim Druck von 735 mm QS dargestellt. Alle möglichen Mischzustände liegen auf der Verbindungslinie 1 2. Diese Gerade schneidet bei A und B die Sättigungslinie. Mischungsverhältnisse der beiden Luftarten 1 und 2, die zwischen den Werten der Streckenverhältnisse $2A : A1$ und $2B : B1$ liegen, führen also zur Nebelbildung. Man kann nach Mollier auch leicht das Verhältnis der flüssigen zur dampfförmigen Feuchtigkeit des Nebels ermitteln. Dazu verfolgen wir die durch den Mischungszustand, z. B. Punkt 3 der Abbildung 1 hindurchgehende Isotherme bis zur Sättigungslinie und lesen hier im Punkt 3' den Sättigungsgehalt x_3' ab. Dann ist x_3' die als Dampf und $x_3 - x_3'$ die in Form von Flüssigkeitströpfchen in dem Gemisch enthaltene Wassermenge.

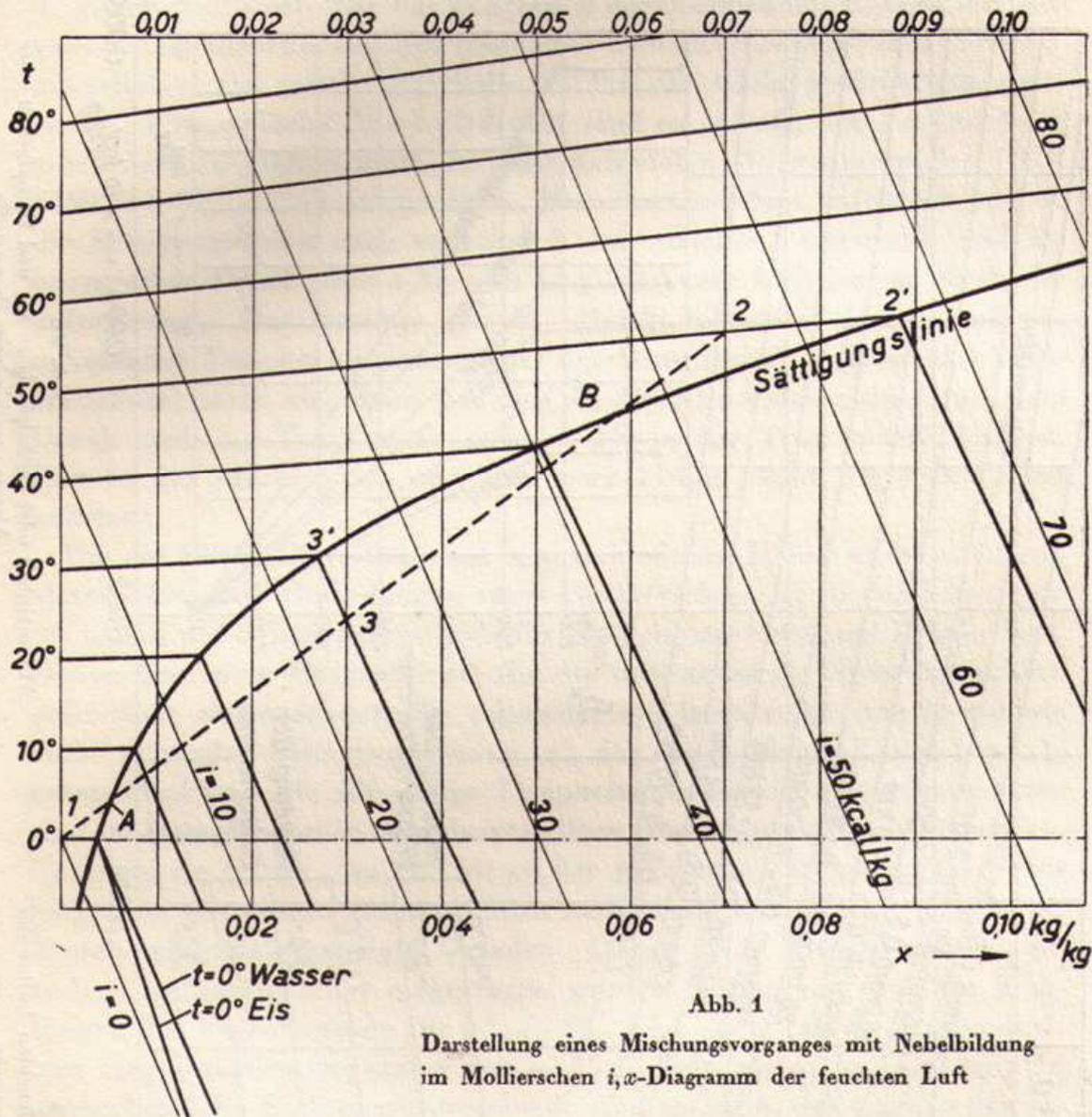


Abb. 1

Darstellung eines Mischungsvorganges mit Nebelbildung im Mollierschen i, x -Diagramm der feuchten Luft

IV. Das i, x -Diagramm für Temperaturen unter 0° und niedere Drücke

Ein i, x -Diagramm für Temperaturen unter Null, das unseren besonderen Zwecken angepaßt ist, ist in Abbildung 2 gezeichnet. Der Maßstab ist in der x -Richtung stark gedehnt, so daß nur der Bereich $0 < x < 0,005$ dargestellt ist. Die Geraden $i = \text{konst.}$ verlaufen daher viel flacher als in Abbildung 1. Da sie im folgenden nicht gebraucht werden, ist nur die Gerade $i = 0$ angegeben. Die Gerade $i_g = 0$ bildet den oberen Rand der Abbildung. Von dieser Geraden an ist zu zählen, wenn man die Euthalpie i_g der Gemische aus Luft und dampfförmigem Wasser von

0° gleich Null setzt. Die das Diagramm durchziehenden Kurven mit Angabe des Luftdruckes und der Höhe über dem Meeresspiegel sind die Sättigungslinien, sie gelten unterhalb 0° für das Gleichgewicht mit einer ebenen Eisoberfläche. Die Luftdrücke sind so gestuft, daß sie den dazugeschriebenen Höhen nach der internationalen Normatmosphäre (DIN 5450 vom Mai 1937) entsprechen. Mit abnehmendem Luftdruck rücken die Sättigungslinien nach rechts, d. h. bei gleicher Temperatur und abnehmendem Druck nimmt die von 1 kg trockener Luft bis zur Sättigung aufnehmbare Wassermenge zu. Bei gleichbleibendem Druck und abnehmender Temperatur nimmt aber der Dampfgehalt x (längs der Sättigungslinie) stark ab. Beim Aufstieg in die Atmosphäre sinkt mit dem Druck auch die Temperatur, solange wir in der Troposphäre bleiben. Erst in der Stratosphäre oberhalb etwa 11 km bleibt die Temperatur konstant.

Um die Sättigungsverhältnisse in verschiedenen Höhen unter mittleren atmosphärischen Bedingungen rasch zu übersehen, ist in das Diagramm die Kurve der Sättigungszustände für die Temperaturen und Drücke bzw. Höhen über dem Meeresspiegel für die internationale Normatmosphäre gestrichelt eingezeichnet. Sie schneidet die jeweils für eine bestimmte Höhe geltenden Sättigungsisobaren an den durch kleine Kreise bezeichneten Punkten. Die für einige Temperaturen gezeichneten Isothermen sind im Dampfgebiet in dem dargestellten Bereich praktisch waagerechte Geraden, sie gelten aber nur bis zu der jeweiligen Sättigungslinie. Hier biegen sie mit einem leichten Knick nach abwärts um und verlaufen im Eisnebelgebiet als geneigte Geraden. Da zu jeder Sättigungslinie eine andere Isothermenschar eingetragen werden müßte, sind nur die Richtungen der Eisisothermen für 0° , -20° und -40° sowie für die mittlere Stratosphärentemperatur von $-56,5^\circ$ links unten in Abbildung 2a angegeben. Die Richtungsunterschiede sind so klein, daß man in dem in Frage kommenden Zustandsbereich alle Eisisothermen praktisch als Parallele ansehen kann. Ferner sind noch die Richtung der 0° - und der -20° -Isotherme des flüssigen also bis -20° unterkühlten Wassers eingezeichnet.

V. Die Mischung von heißen Abgasen mit kalter Luft, dargestellt im i, x -Diagramm

Bei dem Maßstab der Abbildung 2a fallen die Zustandskoordinaten x und $i_g = i - xr = \mathfrak{H}_u$ der Verbrennungsgase üblicher Kraftstoffe weit über den Rand hinaus. Es ist daher rechts unten eine Hilfstafel 2b in 100fach

verkleinertem Maßstab gezeichnet. Die ganze Tafel 2a schrumpft in diesem Maßstab auf das kleine schwarz angelegte Rechteck am linken unteren Rand von 2b zusammen. In der Abbildung 2b sind nun die Zustände der Verbrennungsgase einiger Brennstoffe bei vollständiger Verbrennung ohne Arbeitsleistung mit Luft von 0° als ausgefüllte Kreise eingetragen. Auf die Berücksichtigung der Arbeitsleistung gehen wir weiter unten ein. Die beispielsweise für Benzin gezeichnete gestrichelte Gerade verbindet diesen Zustand des Abgases mit dem Zustand trockener Luft von 0° ; auf ihr liegen alle möglichen Mischungszustände beider Gasarten. Ist die Umgebungsluft kälter als 0° , so rücken beide Endpunkte der Mischgeraden etwas nach unten, ist sie feucht, so verschieben sie sich ein wenig nach rechts. Bis auf praktisch völlig vernachlässigbare Unterschiede bleibt aber die Richtung der Geraden unverändert. Man kann daher die Mischungsgerade in Abbildung 2a durch den hier genauer einzutragenden Zustand der Umgebungsluft parallel zu der entsprechenden Geraden der Abbildung 2b zeichnen. Schneidet diese Mischungsgerade die zu dem betreffenden Druck bzw. der Höhe, bei der die Mischung erfolgt, gehörige Sättigungslinie, so entsteht Nebel. Berührt sie diese nur oder geht daran vorbei, so entsteht kein Nebel. Die Mischungsverhältnisse, bei denen sich Nebel bildet, sind, wie wir in Abbildung 1 gesehen hatten, nach dem Schwerpunktsatz aus der Lage der Schnittpunkte auf der Mischungsgeraden zu ermitteln. Die ganze Länge der Mischungsgeraden in Abbildung 2a ist dabei das Hundertfache ihrer Darstellung in Abbildung 2b.

Ist die Umgebungsluft nicht mit Wasserdampf gesättigt, so treten im allgemeinen zwei Schnittpunkte auf, d. h. bei einem gewissen Mischungsverhältnis entsprechend einer bestimmten Verdünnung des Abgases mit Luft bildet sich Nebel, bei noch stärkerer Verdünnung verschwindet er wieder. Ist die Umgebungsluft mit Wasserdampf gesättigt, so verschwindet der Nebel erst bei unendlich starker Verdünnung des Abgases.

Wir haben bisher den Zustand des Abgases in Abbildung 2b seinem vollen Heizwert entsprechend eingesetzt und wollen nun die ihm im Motor entzogene Arbeit und Wärme berücksichtigen:

Bei Flugmotoren gehen im Mittel vom unteren Heizwert des Brennstoffes 50% in das Abgas, 20% in den Kühler, und rund 30% werden der Luftschaube als mechanische Arbeit zugeführt (diese und die folgenden Zahlenangaben über die Leistungsaufteilung sind abgerundete Werte). Bei einem Wirkungsgrad der Luftschaube von 80% wird ihre Nutz-

leistung in Höhe von 24% des Brennstoffheizwertes an das Flugzeug übertragen und schließlich durch Oberflächenreibung und Wirbelbildung vernichtet. Bei neueren Flugzeugen mit hoher Geschwindigkeit entfällt auf Oberflächenreibung und feine Verwirbelung der größere Teil, der sich rasch in Wärme umsetzt. Der kleinere Teil bleibt länger am Leben in der mechanischen Energie des großen von den Flügeln ausgehenden Doppelwirbels und wird erst in größerer Entfernung hinter dem Flugzeug in Wärme umgewandelt. Für diese Abschätzung wollen wir annehmen, daß diese beiden Anteile von gleicher Größe sind und je 12% des Heizwertes S_u betragen. Die Verlustleistung der Schraube beträgt etwa 20%, das sind 6% des Heizwertes.

In Tabelle 2 ist diese Aufteilung der Leistungen zusammengestellt. Dazu ist das Verhältnis der Luftmengen angegeben, welche diese Energien

Art	Bruchteil des Heizwertes	Gewichtsverhältnis Luftmenge: Abgas	
		am Boden	in 10 km Höhe
Abgas	0,5	1	1
Kühler	0,2	8	5
Schraubenstrahl	0,06	1 000	400
Hautreibung	0,12	10 000	4 000
Doppelwirbel	0,12		

Tabelle 2

Aufteilung der Brennstoffenergie (abgerundete mittlere Werte)

aufnehmen, verglichen mit der Menge des Abgases. Die Zahlen gelten für schnelle Flugzeuge. Mit zunehmender Höhe nehmen die Luftmengen ab. Bei Ladermotoren bleibt aber die Abgasmenge bis zur Volldruckhöhe etwa konstant. Die Kühlluft nimmt wegen der Regelung weniger stark ab, als der Luftdichtenabnahme entspricht. In 10 km Höhe ist vielleicht die Kühlluftmenge noch das 5fache, die Menge des Schraubenstrahles noch das 500fache der Abgasmenge.

Wie wir später sehen werden, kann Nebel sich erst bilden, wenn das Abgas, z. B. bei Benzin, je nach dem Zustand der Atmosphäre mit der etwa 100- und mehrfachen Luftmenge gemischt wird. Es bedarf also der Verdünnung des Abgases mit einem schon beträchtlichen Teil der

Luft des Schraubenstrahles, um Nebel entstehen zu lassen. Da man annehmen darf, daß beim luftgekühlten Motor Abgas und Kühlluft sich schon gemischt haben, bevor sie in zur Nebelbildung ausreichendem Maße mit Schraubenluft verdünnt werden, dürfen wir so rechnen, als ob die ganze Kühlwärme im Abgas bliebe und dieses sich unmittelbar mit kalter Luft mischen würde. Die gleiche Annahme darf man auch beim wassergekühlten Motor machen, wenn der Kühler im Schraubenstrahl liegt, beim Tragflächenkühler ist sie dagegen nicht mehr berechtigt.

Von der Verlustleistung der Schrauben und von der Hautreibung wird ein Teil, den wir auf 5% des Heizwertes schätzen, am Rumpf und am Leitwerk im Bereich des Schraubenstrahles in Wärme umgesetzt, die ebenso wie die Kühlerwärme zur Abgasenergie gezählt werden darf. Wir können also so rechnen, als wenn das Abgas mit einem Wärmeinhalt von 0,75 des Heizwertes sich mit kalter Luft vermischte.

In Abbildung 2a sind die den Wärmeinhalten des Abgases von 75% des Heizwertes entsprechenden Punkte durch leere Kreise bezeichnet. Auf der Senkrechten durch diese Punkte liegen alle möglichen Zustände des unvermischten Abgases der angeschriebenen Brennstoffe. Die gezeichneten Verbindungslinien der Zustandspunkte der Abgase mit 75% Heizwert mit dem Koordinatenursprung sind die Mischgeraden. Je geringer die Steilheit dieser Geraden, um so leichter tritt Eisnebel auf.

VI. Anwendungsbeispiele

Mit Hilfe der Abbildungen 2a und 2b kann man für verschiedene Brennstoffe und für alle möglichen Zustände der Atmosphäre die Gefahr der Nebelbildung beurteilen. Für ein Flugzeug mit dem Kühler im Schraubenstrahl in 10 km Höhe bei -50° , einem Sättigungsgrad der Luft von 0,5 und bei Benzin als Kraftstoff schneidet die Mischgerade des Abgases, das 75% des Heizwertes an Wärme enthält, die Sättigungskurve das erste Mal bei einem Mischungsverhältnis Abgas : Luft von 1 : 117, hier beginnt also die Eisnebelbildung. Der zweite Schnittpunkt, bei dem der Nebel wieder verschwindet, entspricht einem Mischungsverhältnis von 1 : 1500. In Wirklichkeit wird sich der Nebel schon etwas früher auflösen, da bei dieser Verdünnung bereits ein Teil der mechanischen Energie des Schraubenstrahles wieder in Wärme verwandelt ist. Wäre die Umgebungsluft gerade gesättigt, so würde der Nebel bereits bei einem Mischungsverhältnis von 1 : 110 entstehen und erst bei unendlicher Verdünnung wieder

verschwinden. Die Grenzen der Eisnebelgebilde sind stets verwaschen, da der Mischvorgang turbulent verläuft und daher das Feuchtigkeitsfeld Schwankungen gleicher Art aufweist wie das Geschwindigkeitsfeld der turbulenten Bewegung. Nimmt man an, daß der Schraubenstrahl anfangs eine einheitliche Geschwindigkeit sowie einheitliche Temperatur und Feuchtigkeit aufweist, so ist wegen der Analogie von Impuls- und Stoffaustausch bei der Vermischung des Strahles mit der Umgebungsluft das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld dem Felde der Axialkomponente der Geschwindigkeit ähnlich.

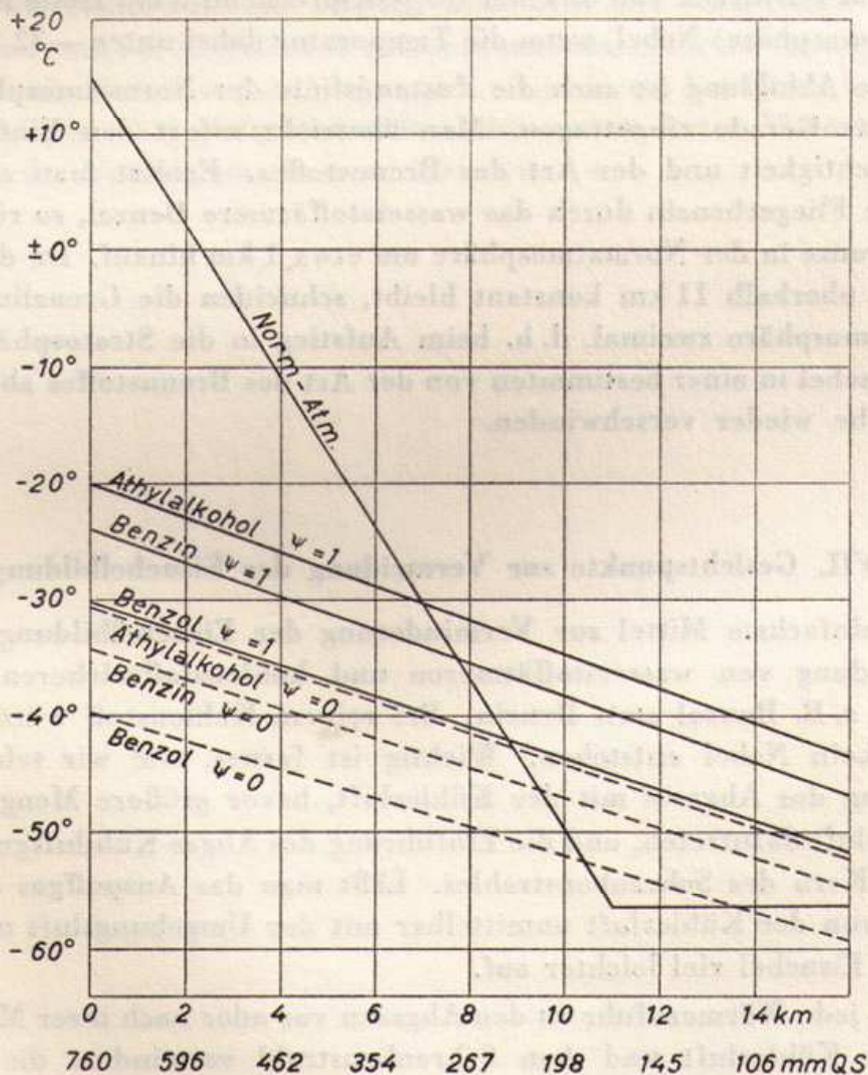


Abb. 3

Grenzen der Eisbildung durch Motorabgas bei trockener ($\psi = 0$) und gesättigter Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe und von der Art des Brennstoffes

Die Zustände der Atmosphäre, bei denen sich gerade noch Eisnebel bilden kann, erhält man aus den Berührungspunkten der Mischgeraden eines Brennstoffes mit den Sättigungslinien. Diese Grenzen wurden für die 3 Brennstoffe Äthylalkohol, Benzin und Benzol bei gesättigter Luft ($\psi = 1$) und bei völlig trockener Luft ($\psi = 0$) mit Hilfe von Abbildung 2 für Abgas mit 75% Heizwert ermittelt und in dem Koordinatenfeld von Temperatur und Druck bzw. Höhe der Abbildung 3 dargestellt. Bei Zuständen der Atmosphäre unterhalb der Grenzlinie tritt Eisnebel auf, darüber nicht. Bei Benzin und gesättigter Umgebungsluft entsteht z. B. bei einem Luftdruck von 354 mm QS (entsprechend 6 km Höhe nach der Normatmosphäre) Nebel, wenn die Temperatur dabei unter $-32,5^\circ$ liegt.

In die Abbildung ist auch die Zustandslinie der Normatmosphäre als geknickte Gerade eingetragen. Man übersieht sofort den Einfluß der Luftfeuchtigkeit und der Art des Brennstoffes. Ersetzt man z. B. das normale Fliegerbenzin durch das wasserstoffärmere Benzol, so rückt die Nebelgrenze in der Normatmosphäre um etwa 1 km hinauf. Da die Temperatur oberhalb 11 km konstant bleibt, schneiden die Grenzlinien die Normatmosphäre zweimal, d. h. beim Aufstieg in die Stratosphäre muß der Eisnebel in einer bestimmten von der Art des Brennstoffes abhängenden Höhe wieder verschwinden.

VII. Gesichtspunkte zur Vermeidung der Eisnebelbildung

Das einfachste Mittel zur Verminderung der Eisnebelbildung ist die Verwendung von wasserstoffärmeren und kohlenstoffreicheren Kraftstoffen, z. B. Benzol statt Benzin. Bei reinem Kohlenstoff würde überhaupt kein Nebel entstehen. Wichtig ist ferner, wie wir sehen, die Mischung des Abgases mit der Kühlerluft, bevor größere Mengen Umgebungsluft dazutreten, und die Einführung des Abgas-Kühlluftgemisches in den Kern des Schraubenstrahles. Läßt man das Auspuffgas sich getrennt von der Kühlerluft unmittelbar mit der Umgebungsluft mischen, so tritt Eisnebel viel leichter auf.

Auch jede Wärmezufuhr zu den Abgasen vor oder nach ihrer Mischung mit der Kühlerluft und dem Schraubenstrahl vermindert die Nebelbildung, sofern man mit der Wärme nicht zugleich Wasserdampf zuführt. Man könnte also daran denken, im Schraubenstrahl reinen Kohlenstoff zu verbrennen, aber dieses Mittel ist praktisch kaum anwendbar.

Noch weniger ausführbar ist der naheliegende Gedanke, dem Abgas durch Kühlung Wasser zu entziehen, wie es bei den Zeppelinluftschiffen zur Ballastgewinnung geschah. Dazu müßten die Abgase vor der Mischung mit Luft unter ihren Taupunkt abgekühlt werden. Leider sind die nötigen Kühlflächen für ein Flugzeug zu schwer und mit zu großen Strömungswiderständen behaftet, so daß diese Möglichkeit ausscheidet.

Dem Flieger in der Luft, der eine Nebelfahne hinter sich beobachtet, bleibt als Gegenmittel nur tiefer zu fliegen oder den Motor zu drosseln. Im ersten Fall hört selbst in gesättigter Normatmosphäre unterhalb 8,2 km der Nebel auf. Im zweiten Fall wird die Nebelfahne dünner und kürzer, um bei Abstellen des Motors natürlich ganz zu verschwinden. Auch durch Drücken des Flugzeuges, also durch Erhöhen der Flugeschwindigkeit bei gleichbleibender oder verminderter Motorleistung, läßt sich die Nebelfahne etwas verkleinern.

Aussprache

Georgii: Das Problem der Wolkenbildung durch Flugzeuge wird bei der DFS seit Oktober vorigen Jahres untersucht. Der erste Forschungsbericht über diese Untersuchungen ist im November vergangenen Jahres über das gleiche Thema, welches Herr Schmidt behandelt hat, von Herrn Höhdorf herausgegeben worden.

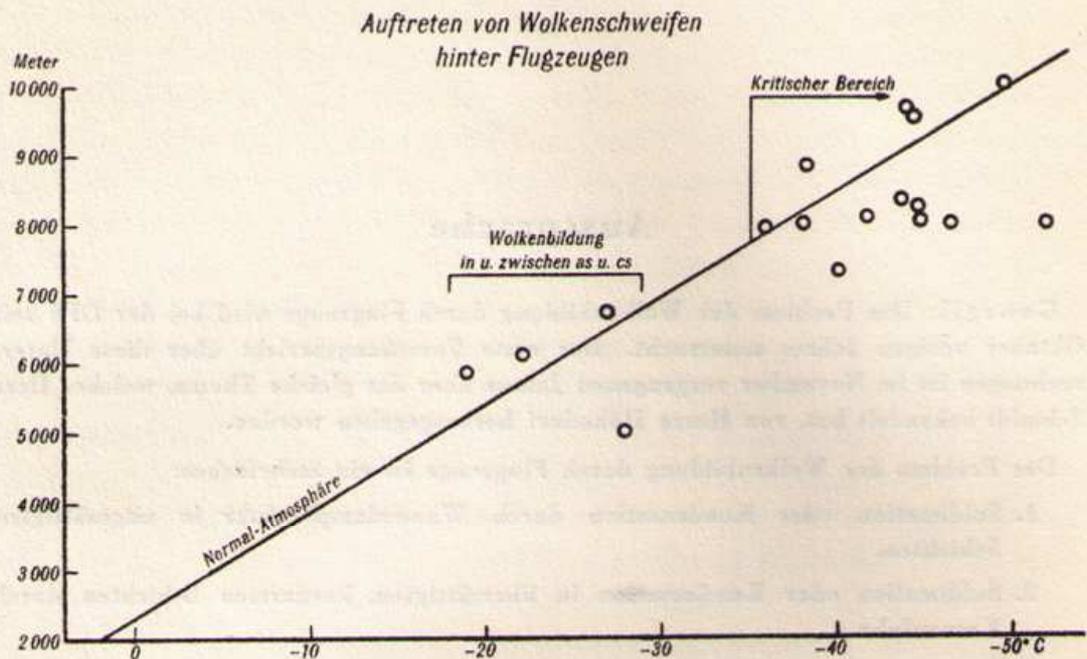
Das Problem der Wolkenbildung durch Flugzeuge ist ein mehrfaches:

1. Sublimation oder Kondensation durch Wasserdampffuhr in ungesättigten Schichten,
2. Sublimation oder Kondensation in übersättigten, kernarmen Schichten durch Kernzufuhr,
3. Umbildung der künstlich erzeugten Wolken unter bestimmten Feuchteverhältnissen der Atmosphäre.

Der erste Vorgang, Sublimation oder Kondensation durch Wasserdampffuhr in ungesättigten Schichten, ist der häufigere. Höhdorf ist von anderen Berechnungsgrundlagen ausgegangen als Herr Schmidt. Er nimmt an, daß der durchmischte Raum hinter dem Flugzeug sich längere Zeit unverändert hält. Die Beobachtung von Rauchfahnen an Schornsteinen und die Feststellung, daß die Wolkenfahne hinter dem Flugzeug zwei nebeneinanderliegende entgegengesetzt rotierende Wirbel bildet, berechtigen zu dieser Annahme. In dem Mischungsraum hinter dem Flugzeug kommt Wolkenbildung bei gesättigter Luft zustande:

	nach Schmidt	nach Höhdorf
In 4 000 m bei Temperaturen von	— 30° C	— 31° C
In 8 000 m bei Temperaturen von	— 35° C	— 37,5° C.

Die Ergebnisse stimmen also gut überein. Aufm Kampe und Weickmann von der DFS haben auf Grund der von ihnen durchgeführten Flüge das Auftreten der Wolken-
schweife hinter Flugzeugen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Luftfeuchte untersucht. Die beifolgenden Abbildungen veranschaulichen die hierbei festgestellten Beziehungen. In Abbildung 1 treten zwei Häufungsbereiche des Auftretens der Wolken-
fahnen hervor, der erste in 6 000 m Höhe bei Temperaturen von — 25° C, der zweite oberhalb 8 000 m Höhe bei Temperaturen unter — 40° C. Im tieferen Bereich weicht die Temperatur bei auftretenden Wolkenfahnen von dem theoretisch abgeleiteten Wert nicht unerheblich ab. Entweder beruht diese Abweichung auf geringerer Wärmeabgabe des Motors an die Luft als sie bei den theoretischen Ableitungen zugrunde gelegt worden ist, oder sie hängt mit Übersättigung der umgehenden Luft zusammen. Die DFS hat begonnen, die Lufttemperaturen im Mischungsraum hinter dem Flugzeug zu messen,



um so Werte über die Wärmeabgabe des Motors zu erhalten. Bei einer bisher durchgeführten Messung hat sich im Mischungsraum 30 m hinter dem Flugzeug eine Über-temperatur von 4° ergeben. Dieser Wert stimmt gut mit der von Höndorf in seiner theoretischen Arbeit zugrunde gelegten Temperaturerhöhung überein. Da bei dem Auftreten der Wolkenschweiften hinter dem Flugzeug in 6 000 m Höhe und bei Temperaturen von -25° gleichzeitig natürliche Wolken, also Altostratus und Cirrostratus, in der fraglichen Schicht vorhanden waren, kann angenommen werden, daß diese Schicht wasserdampfgesättigt oder sogar übersättigt gewesen ist. Der obere Bereich der Abbildung 1, welcher das Auftreten von Wolkenschweiften oberhalb 8 000 m Höhe und bei Temperaturen unter -40° umfaßt, entspricht den Ergebnissen der theoretischen Ableitung über Wolkenschweifbildung in ungesättigten Schichten bei tieferer Temperatur.

Abbildung 2 zeigt Wolkenschweifbildung in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte. Drei Bereiche treten hervor, links von der unteren Geraden, begrenzt etwa von den Temperatur- und Feuchtwerten von -10° C und 65% und -50° C und 20%, tritt keine Wolkenbildung auf, rechts von der oberen Geraden, mit Werten von -40° C und 50% bzw. -50° C und 38%, zeigen sich sehr lange Wolkenschweife, die sich auch nach längerer Zeit noch nicht aufgelöst haben, sondern beständig sind. Diese beständigen Wolkenschweife nehmen gewissermaßen meteorologischen Charakter an, sie formen sich dem Zustand der Atmosphäre entsprechend um und wachsen zum Teil als Wolken weiter. Solche Umgestaltung von künstlich erzeugten Wolken zu meteorologischen Wolken werden vielfach beobachtet, und zwar in der Weise, daß Eiskristalle in tiefere, feuchtere Schichten absinken und weiter wachsen. Es ist die gleiche Erscheinung, auf die ich in meinem Akademievortrag im Juni vorigen Jahres hingewiesen habe.

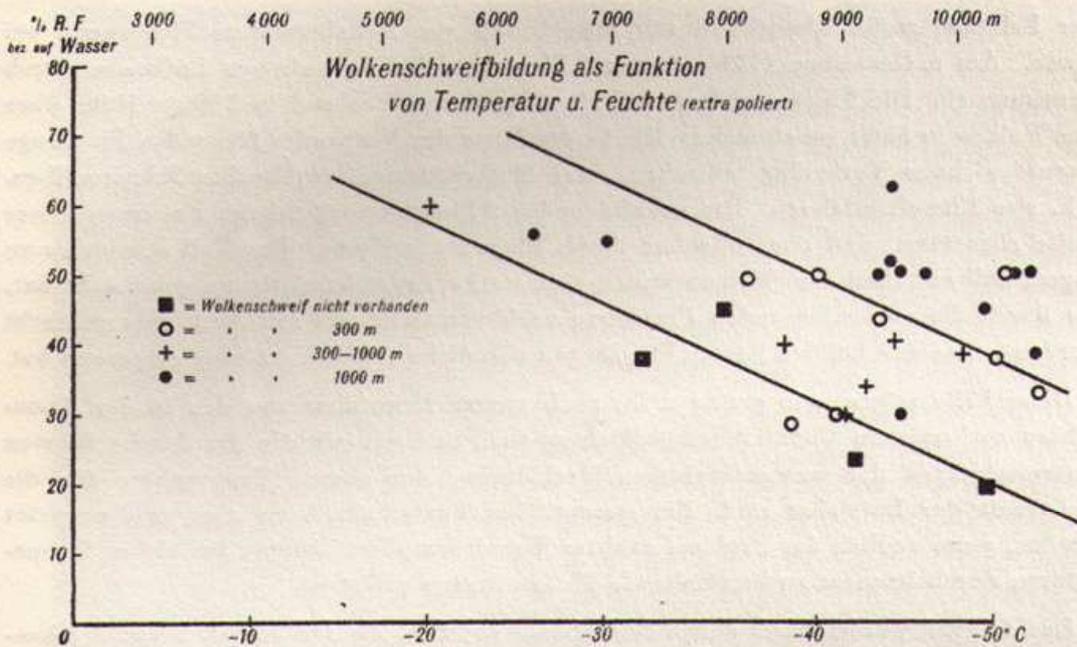


Abb. 2

Das Problem der Sublimation und Kondensation in übersättigten, kernarmen Schichten durch Kernzufuhr konnte bis heute noch wenig geklärt werden. Offenbar treten Übersättigungen ohne Kondensation oder Sublimation aber nicht so häufig auf wie dies A. Wegener angenommen hatte. Manche der von Wegener beobachteten Erscheinungen dürften auf Wasserdampffzufuhr zurückzuführen sein. Auf ihren Höhenflügen macht die DFS Versuche mit Infektion von hygroskopischen und nichthygroskopischen Kernen in der oberen Troposphäre. Eindeutige Ergebnisse sind bisher noch nicht erzielt worden. Die Versuche kranken z. Zt. noch an der Unmöglichkeit, die Wasserdampfsättigung bei tiefen Temperaturen einwandfrei zu messen.

Auf Grund der bisherigen Erfahrungen über Wolkenschweifbildung hinter Flugzeugen hat die DFS auf Anforderung ein Merkblatt für die Front herausgebracht. Langsame Flugzeuge erzeugen leichter Wolkenschweife als Schnellflugzeuge. Bei kurzen Wolkenschweifigen gewährt wechselnder Übergang von Vollgas- und Drosselflug einen gewissen Schutz. Bilden sich lange und beständige Wolkenfahnen, so muß abwechselnd mit Steig- und Gleitflug geflogen werden.

Das behandelte Problem hat weitere Bedeutung für die Bedingungen der Flugzeugvereisung. Jaumotte hat auf einen interessanten Fall der Flugzeugvereisung hingewiesen, der im Zusammenhang mit den hier behandelten Erscheinungen steht. Über einer Regen- und Hagelwolke in etwa 5 000 m Höhe bildete sich in einer vollkommen klaren Schicht 6—10 cm dickes Eis an einem Flugzeug. Die Stärke des Eisansatzes erscheint zwar übertrieben, immerhin geht aus dem Vorfall hervor, daß offenbar über der Cumuluswolke eine klare Schicht mit hoher Übersättigung gelegen hat, deren Instabilität durch das Flugzeug ausgelöst wurde und zu rapider Vereisung geführt hat.

Der Fall hat große Ähnlichkeit mit dem Unfall von 3 italienischen Flugzeugen bei Lucca. Am 6. Dezember 1939 stürzten 3 Flugzeuge der italienischen Luftwaffe durch Vereisung ab. Die Flugzeuge flogen in einem größeren Verband in 3 000 m Höhe über den Wolken in Sicht voneinander. Die in der Mitte des Verbandes fliegenden Flugzeuge erzeugten beim Vorbeiflug zwischen zwei Wolkentürmen regelrechte Schneewolken, d. h. also Eiswolkenfahnen. Die nachfolgenden 3 Flugzeuge sind beim Passieren dieser Stelle abgestürzt, und zwar offenbar durch Flugzeugvereisung. Der Fall scheint so zu liegen, daß zwischen den Wolkentürmen eine starke Frostübersättigung geherrscht hat, die durch die vorausfliegenden Flugzeuge noch verstärkt und zur Auslösung gebracht worden ist, so daß bei den letzten Flugzeugen plötzliche rapide Vereisung eingesetzt hat.

Diese Fälle zeigen, wie gering z. Zt. noch unsere Kenntnisse von den in der Atmosphäre vorhandenen Übersättigungsschichten sind, und wie wichtig die durchgeführten Untersuchungen der meteorologischen Verhältnisse der oberen Troposphäre für die Sicherheit der Luftfahrt sind. Ein wesentlicher Fortschritt kann aber erst erwartet werden, wenn endlich das Problem exakter Wasserdampfbestimmung bei tiefen Temperaturen durch bequem zu handhabende Meßmethoden gelöst ist.

Nachfolgend werden noch einige Aufnahmen gegeben, die bei der DFS von Wolkenfahnen hinter Flugzeugen gemacht worden sind.

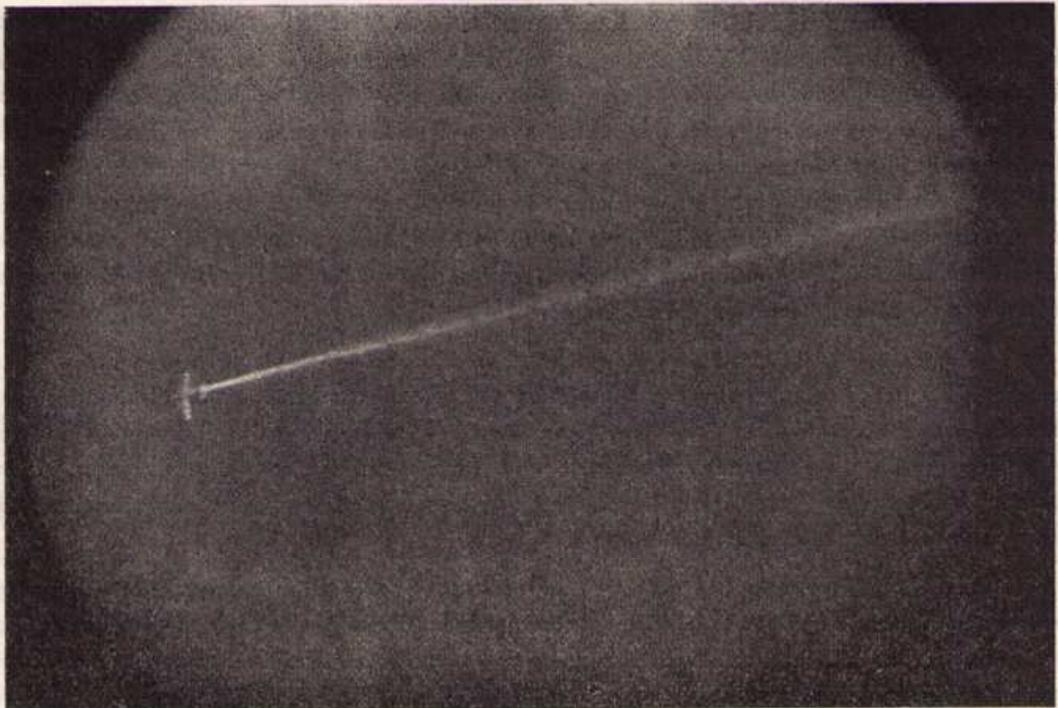


Abb. 3

Fernrohraufnahmen eines Flugzeugs mit Wolkenfahne in 9000 m Höhe

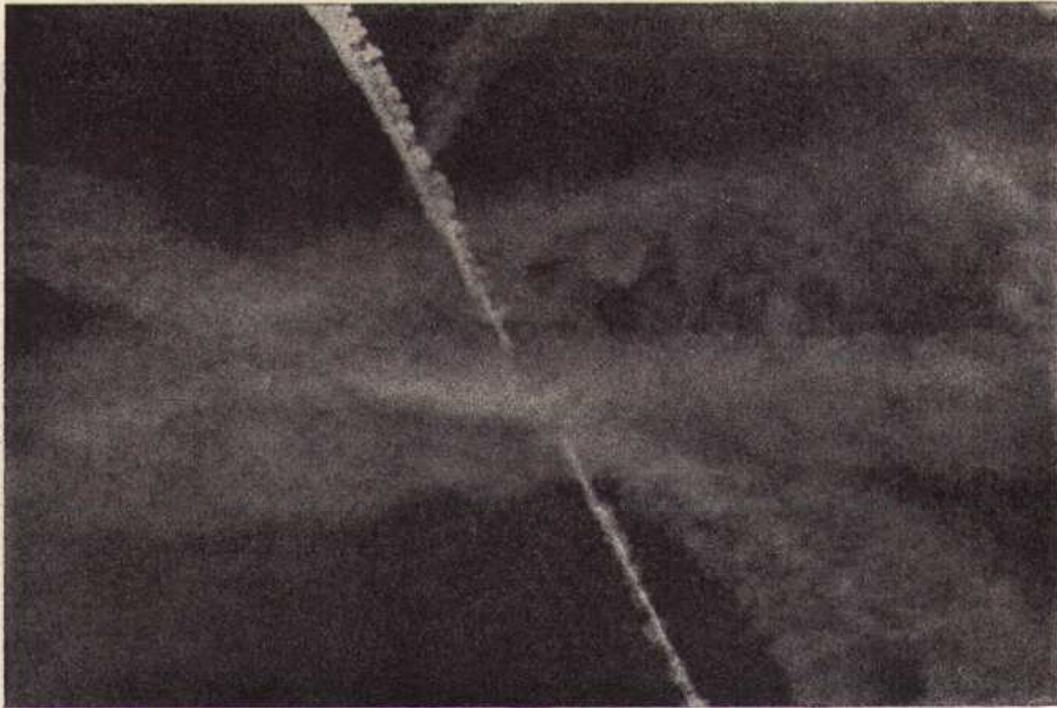
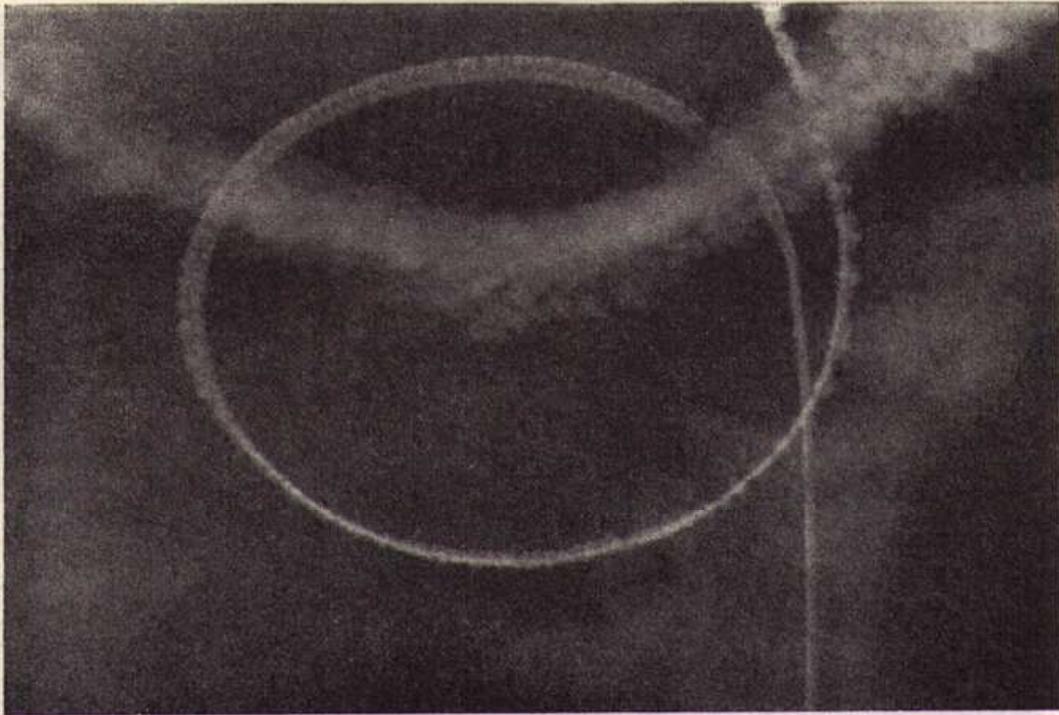


Abb. 4 u. 5

Beständige Wolkenfahnen, die sich verbreitern und größere Ausdehnung erlangen.
Übergang von künstlichen zu natürlichen Wolken



Abb. 6
Wolkenfahne mit Fallstreifen ausfallender Eiskristalle



Abb. 7
Umbildung einer Wolkenfahne zur natürlichen Wolke

