

Die Heft

Prüf-Nr. 49

Oberkommando der Kriegsmarine / Chef Marinewetterdienst

544

Marineobservatorium
Klimadienst
Forschungs- u. Entwicklungsabtl.
Archiv-Nr. **208**

G e h e i m .

Deutscher Wetterdienst
Meteorologisches Observatorium
Hamburg

Erfahrungsberichte

des

Marinewetterdienstes

Reihe B — Heft 4

Hierzu 6 Tabellen, 42 Abbildungen



Meteorologisches Amt d. W.M.
Forschungs- u. Entwicklungsabtl.

Dies ist ein geheimer Gegenstand im Sinne des § 83 Reichs-Straf-Gesetzbuches (Fassung vom 24. April 1934). Mißbrauch wird nach den Bestimmungen dieses Gesetzes bestraft, sofern nicht andere Strafbestimmungen in Frage kommen.

Meteorologisches Amt f. NWD
Forschungs- u. Entwicklungsabtlg.
Archiv-Nr. 208

Der Einfluß der meteorologischen Bedingungen auf
Eigenschaften und Erscheinungsform des
künstlichen Nebels

Deutscher Wetterdienst
Meteorologisches Observatorium
Hamburg

von
Dr. Peter Kornmann

Handbücherei Met. Obs. Hbg.
Inv. Nr.:

Meteorologisches Amt f. NWD.
Forschungs- u. Entwicklungsabtlg.
237/27M

Herausgegeben
vom
Marineobservatorium
1943

T. G. M.

1. Einleitung.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass der künstliche Nebel einer starken Veränderlichkeit unterliegt, die von den wettermässigen Bedingungen abhängt. Ausser allgemeinen Erfahrungsberichten liegen keine systematischen Untersuchungen über den künstlichen Nebel vor. Es war daher der Zweck der vom Marineobservatorium durchgeführten Versuche, diese Lücke auszufüllen und die Eigenschaften des Nebels sowie die Abhängigkeit seiner Gestaltung von den meteorologischen Verhältnissen zu untersuchen. Das Ziel der Arbeit, eine Grundlage für die Beurteilung einer künstlichen Vernebelung zu schaffen, wurde ursprünglich durch die Analyse der Erscheinungsform einer einzelnen Nebelfahne unter der Gesamtwirkung der meteorologischen Elemente in der bodennahen Luftschicht zu erreichen versucht. Dieser Plan musste abgeändert und erweitert werden. Die Wirkung der meteorologischen Elemente auf die künstliche Vernebelung ist wesensverschieden, sie kann daher nicht zu einem einheitlichen Faktor zusammengefasst werden. Die stoffliche Grundlage des künstlichen Nebels ist das Wasser. Sein mengenmässiger Anteil wird von den Feuchtigkeitsverhältnissen der Luft bestimmt; von der relativen Feuchtigkeit hängt unmittelbar die Grösse der Nebeltröpfchen ab. Demgegenüber wirken die übrigen meteorologischen Elemente - Wind und Temperaturschichtung - gestaltend; sie geben dem vorliegenden Stoff die Form.

Erst wenn diese beiden Anteile einzeln in ihrer Wirkung erkannt sind, ergibt sich aus ihrer Synthese die Grundlage für die Beurteilung einer Vernebelung.

Aus diesen Ausführungen leitet sich die Gliederung der vorliegenden Untersuchung zwanglos ab; zuerst werden die stofflichen Grundlagen des künstlichen Nebels und seine physikalischen Eigenschaften behandelt; im 3. Teil wird der Nebel unter dem Einfluss der gestaltenden meteorologischen Elemente betrachtet, und schliesslich werden im 4. Teil die Ergebnisse für die praktische Beurteilung einer Vernebelung ausgewertet.

■

&

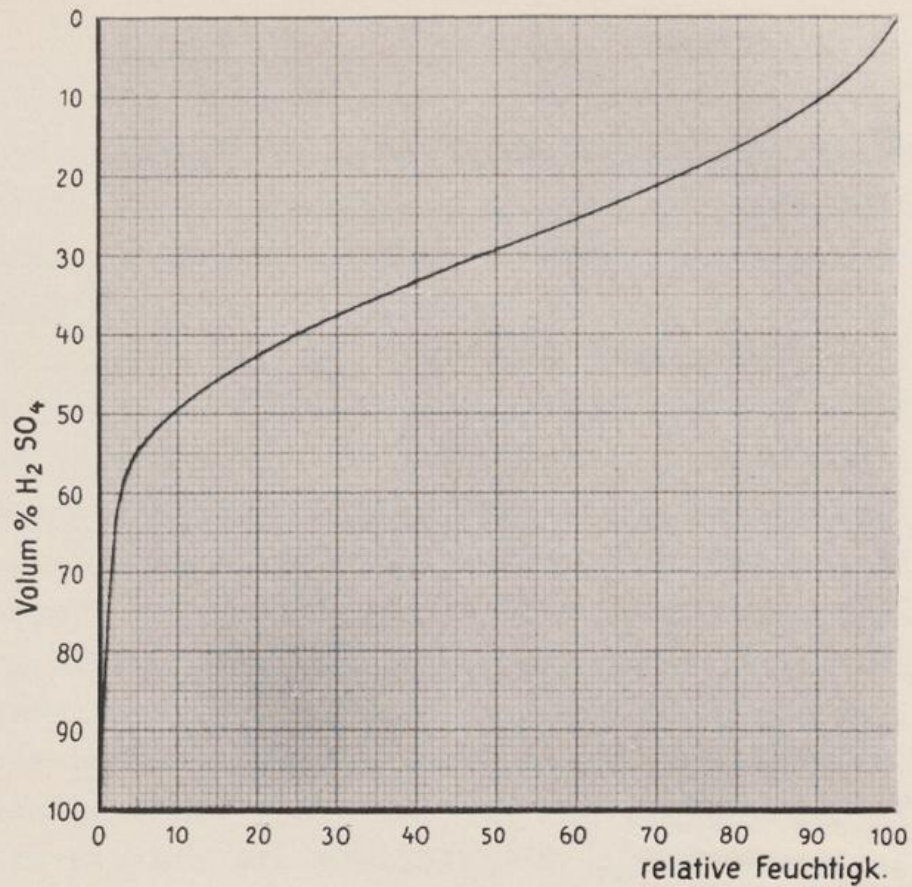


Abb. 1. Relative Feuchtigkeit über Schwefelsäurelösungen (nach Nielsen und Thamdrup)

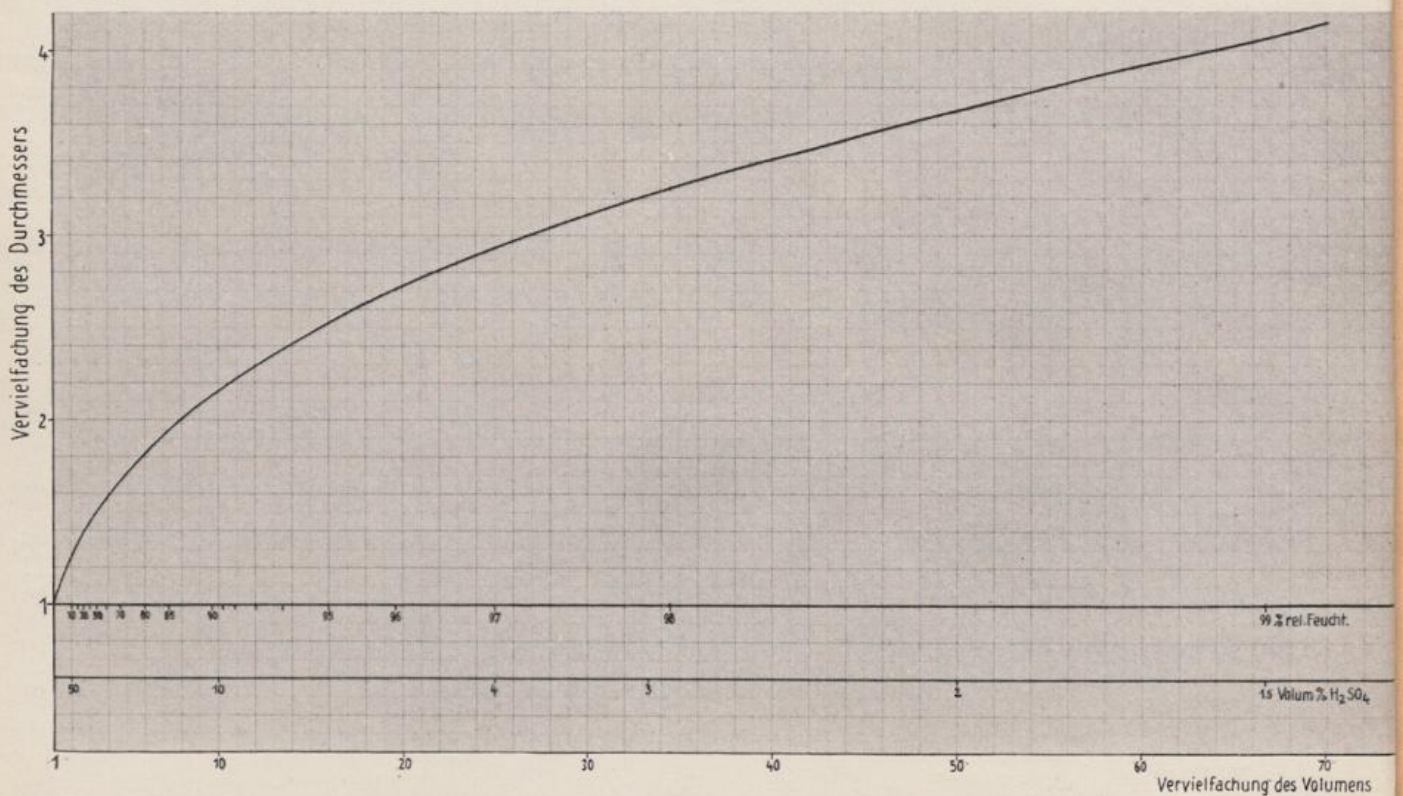


Abb. 2. Änderung von Durchmesser, Volumen und Konzentration eines kugelförmigen Schwefelsäuretröpfchens in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit.

2. Die physikalischen Eigenschaften des künstlichen Nebels.

A. Die Abhängigkeit der Tropfengröße von der relativen Feuchtigkeit.

Die Tropfengröße des künstlichen Nebels wird von der relativen Feuchtigkeit bestimmt. Die Tropfen bestehen aus Lösungen von Schwefelsäure, deren Konzentration von der Luftfeuchtigkeit abhängt. Schwefelsäure ist hygroskopisch und zieht solange Wasser an, bis ihr Dampfdruck gleich dem Dampfdruck in der umgebenden Luft ist. Dabei wächst das Volumen der Tröpfchen und zugleich verdünnt sich die Lösung, bis bei einer bestimmten Konzentration der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Bringt man eine Schwefelsäurelösung in einen trockenen Raum, so gibt sie so lange Wasser ab und konzentriert sich, bis wiederum der Dampfdruck in der Luft und der Dampfdruck über der Lösung gleich sind. In abgeschlossenen Gefäßen stellt sich daher über Schwefelsäurelösungen jeweils eine ganz bestimmte relative Feuchtigkeit ein. Die Beziehung zwischen relativer Feuchtigkeit und Konzentration der Schwefelsäure ist in Abb. 1 dargestellt. Auf der Ordinate ist die Konzentration in Volumenprozent, auf der Abszisse die relative Feuchtigkeit eingetragen. Über reiner Schwefelsäure ist die Luft völlig trocken, über einer 50-prozentigen Lösung beträgt die relative Feuchtigkeit 10 %; sie steigt auf 80 % über einer 17-volumprozentigen Schwefelsäurelösung, auf 95 % über einer 6-prozentigen Lösung und erreicht 100 % erst bei einer unendlichen Verdünnung der Schwefelsäure, d.h. also praktisch über reinem Wasser.

In der Darstellung Abb. 2 ist diese allgemeine Abhängigkeit auf kugelige Tropfen übertragen und zugleich die Konzentrationsänderung der Schwefelsäure mit den damit verbundenen Änderungen ihres Volumens und Tropfendurchmessers in Beziehung gebracht. Auf der Abszisse ist die relative Feuchtigkeit, auf der Ordinate die Vervielfachung des Tropfendurchmessers eingetragen. Das Diagramm gibt damit für jede relative Feuchtigkeit den Durchmesser eines Tröpfchens als Vielfaches seines auf reine Schwefelsäure konzentrierten Durchmessers an. Die 2. und 3. Abszisse geben die Gleichgewichtsverhältnisse wieder, die zwischen relativer Feuchtigkeit und Konzentration der Schwefelsäurelösung bzw. deren volumenmäßiger Änderung bestehen.

Einige Beispiele geben Zahlenwerte für die gegenseitige Verknüpfung dieser veränderlichen Größen: Ein Tröpfchen reiner Schwefelsäure mit dem Durchmesser 1 und dem Volumen 1 zieht Wasser an und verdoppelt sein Volumen. Dann verringert sich die Konzentration der Schwefelsäure auf 50 % und der Durchmesser wächst auf das 1,26-fache an. Eine 50 %ige Schwefelsäurelösung steht im Gleichgewicht mit einer relativen Feuchtigkeit von 10 %. Wenn das Tröpfchen weiter Wasser anzieht, bis sich sein Durchmesser verdoppelt hat, so hat sich sein Volumen verachtzefacht und die Konzentration der Schwefelsäure ist auf 12,5 % gesunken. Eine Lösung dieser Konzentration verändert sich nicht bei einer relativen Feuchtigkeit von 87 %. Bei zunehmender Feuchtigkeit vergrößern sich die Tropfen rasch, sodaß bei 95 % der 2,5-fache, bei 97,3 % der 3-fache, bei 99 % der 4-fache Durchmesser erreicht wird.

B. Die Messung der Tropfengröße des künstlichen Nebels.

Zur Bestimmung der Tropfengröße des künstlichen Nebels diente die direkte mikroskopische Messung. Die Tröpfchen wurden an Kanadabalsamfäden aufgefangen, die über die 15 mm große Öffnung durchbohrter Objektträger gespannt waren. Die Dicke der Fäden schwankte zwischen 1,5 und $30 \cdot 10^{-3}$ mm. Zum Auffangen der Nebeltröpfchen wurden diese Objektträger ganz kurze Zeit (etwa eine Sekunde lang) dem vorüberziehenden Nebel ausgesetzt. Während dieser Zeit setzte sich eine ausreichende Anzahl von Nebeltröpfchen an den Fäden an. Je dünner die Fäden waren, umso stärker war der Tropfenansatz. Der geringere Ansatz auf den dicken Fäden ist auf den Widerstand zurückzuführen, den diese der vorbeiströmenden Luft entgegensetzen. Zum Ausmessen eignet sich der geringe Ansatz auf den dickeren Fäden am besten, weil hier die Wahrscheinlichkeit verringert ist, daß mehrere Tröpfchen zusammengefloffen sind.

Die Nebelproben erschienen recht einheitlich; die meisten Tröpfchen hatten bei einer relativen Feuchtigkeit von 70 % einen Durchmesser von rund 10^{-3} mm. Dickere Tröpfchen waren in geringerer Zahl, kleinere etwas reichlicher vorhanden. Da die Größe der Nebeltröpfchen selbst bei der stärkstmöglichen Vergrößerung nur einen Bruchteil der Teilstriche eines Okularmikrometers ausmachte, war eine genauere statistische Ausmessung nicht möglich.

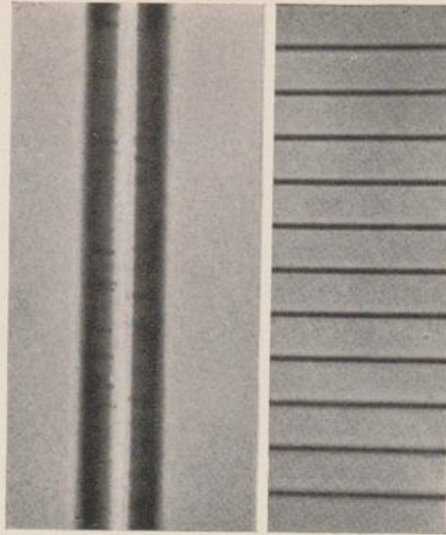


Abb. 3. Nebeltröpfchen bei 70% relativer Feuchtigkeit auf einem Kanadabalsamfaden.
Teilstriche des Objektmikrometers $10 \cdot 10^{-3}$ mm.

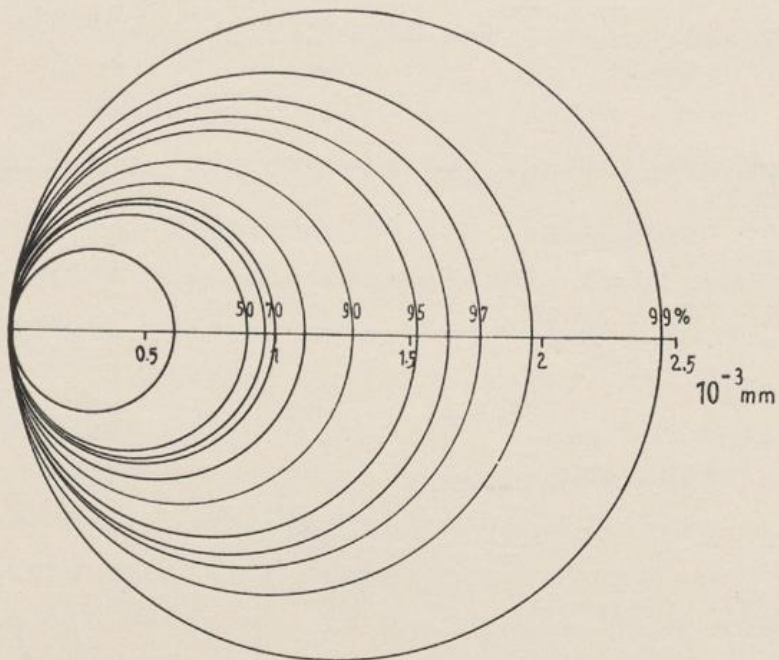


Abb. 4. Durchschnittliche Größe der Nebeltröpfchen bei verschiedener relativer Feuchtigkeit.

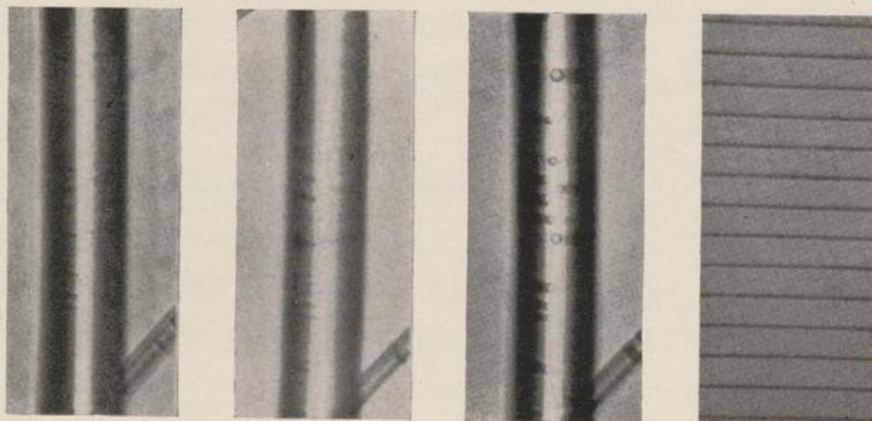


Abb. 5. Fadenstück mit Nebeltröpfchen bei einer relativen Feuchtigkeit von 70%, 90% und etwa 98%
in den drei aufeinanderfolgenden Bildern. Teilstriche des Objektmikrometers $10 \cdot 10^{-3}$ mm.

Abb.3 gibt die Aufnahme eines Präparates bei 70 % relativer Feuchtigkeit wieder. Die Tröpfchen, die nicht genau auf der Fadenmitte sitzen, erzeugen einen mehr oder weniger starken Schatten. Die Teilstriche des wiedergegebenen Objektmikrometers bedeuten je $10 \cdot 10^{-3}$ mm.

Da bei der Kleinheit der Tröpfchen eine genauere Messung nicht möglich war, konnte darauf verzichtet werden, einen Faktor für die Abplattung der Tröpfchen einzusetzen.

Nachdem der Tropfendurchmesser bei einer relativen Feuchtigkeit von 70 % bekannt ist, lässt sich nach der in dem Diagramm Abb.2 dargestellten Beziehung der mittlere Tropfendurchmesser bei beliebiger relativer Feuchtigkeit berechnen. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Der kleinste Kreis entspricht dem Querschnitt eines auf reine Schwefelsäure konzentrierten Nebeltröpfchens, die übrigen Kreise entsprechen der Tropfengrösse bei der jeweils angegebenen relativen Feuchtigkeit. Der Durchmesser schwankt zwischen $0,9 \cdot 10^{-3}$ mm und rund $2 \cdot 10^{-3}$ mm bei Feuchtigkeitswerten zwischen 50 und 98 %.

Zum Nachweis der Grössenänderung wurde ein Nebeltröpfchen-Präparat nacheinander in feuchte Kammern mit 70 %, 90 % und ca. 98 % relativer Feuchtigkeit eingeschlossen und jeweils das gleiche Fadestück photographiert (Abb.5) . Wenn auch wiederum bei der Kleinheit der Tröpfchen eine genaue Ausmessung nicht möglich ist, so ist die Grössenzunahme doch deutlich zu erkennen, die nach der Berechnung in den aufeinanderfolgenden Bildern im Verhältnis 1:1,3:2 stehen sollte. Bei einem genauen Vergleich der 3 Bilder kann man feststellen, dass einige besonders dicke Tropfen aus der Vereinigung mehrerer benachbarter Tröpfchen hervorgegangen sind, die sich bei ihrer Wasseraufnahme berührten.

Die Tröpfchen des künstlichen Nebels sind also wesentlich kleiner als die des natürlichen Nebels. Während der Versuche war Gelegenheit, mit der oben angegebenen Methode auch die Grösse natürlicher Nebeltröpfchen zu bestimmen. In einem stark nässenden Nebel schwankte ihre Grösse zwischen 2 und $70 \cdot 10^{-3}$ mm, die meisten Tropfen waren zwischen 20 und $40 \cdot 10^{-3}$ mm dick. Dieses Ergebnis stimmt mit dem anderer Autoren und mit verschiedenen Methoden durchgeführten Messungen überein.

Ein Einfluss der Düsenleistung auf die Größe der Nebeltröpfchen war nicht festzustellen. Lediglich schien bei der 1/2 l-Düse der Anteil der Tröpfchen, die über Durchschnittsgröße maßen, etwas geringer zu sein als bei den 3/4l- und 1l-Düsen.

C. Der Anteil des Wassers im künstlichen Nebel.

Den Wasserentzug aus der Luft bei der Bildung des künstlichen Nebels muß man für die Berechnung in zwei Vorgänge aufteilen:

1. den Bedarf an Wasser zur Bildung von Schwefelsäure aus den Anteilen der Nebelsäure (50% HCl SO₃, 50% SO₃),
2. die Wasseraufnahme der hygroskopischen Schwefelsäuretröpfchen bis zur Einstellung des Gleichgewichtes bei einer bestimmten relativen Feuchtigkeit.

Zu 1) Zur Aufspaltung eines Mols Chlorsulfonsäure in Salz- und Schwefelsäure ist ein Mol Wasser erforderlich:



Aus 116,5 g Chlorsulfonsäure entstehen bei Einwirkung von 18 g Wasser 98 g Schwefelsäure. Das Anhydrid vereinigt sich mit einem Molekül Wasser zu Schwefelsäure, sodaß aus 80 g Schwefeltrioxyd 98 g Schwefelsäure gebildet werden. Wird eine Düse mit einer Leistung von 1l Nebelsäure in der Minute benutzt, so werden in der Sekunde 16,7 cm³ oder 30,7 g Säure versprüht. Diese Menge benötigt zu ihrer Umwandlung 5,8 cm³ Wasser und es entstehen 31,8 g oder 17,2 cm³ Schwefelsäure.

Zu 2) Die Schwefelsäure entzieht der Luft Wasser, dessen Menge von der relativen Feuchtigkeit abhängt und aus dem Diagramm Abb. 2 zu entnehmen ist.

In Tabelle 1 sind die bei der Nebelbildung benötigten Wassermengen unter verschiedenen Gesichtspunkten zusammengestellt. Die Feuchtigkeitswerte in Spalte 1 beziehen sich auf die nebelhaltige Luft. In Spalte 2 sind die von 17,2 cm³ Schwefelsäure hygroskopisch gebundenen Wassermengen angegeben. Spalte 3 enthält die Gesamtmenge Wasser, die von 16,7 cm³ Nebelsäure der Luft entzogen wird; in diesen Zahlen sind also die 5,8 g Wasser eingerechnet, die zur Umwandlung der Nebelsäure erforderlich sind. In Spalte 4 ist schliesslich die von 16,7 cm³ Nebelsäure erzeugte Nebelmenge zusammengestellt; sie setzt sich aus der Schwefelsäuremenge von

jeweils $17,2 \text{ cm}^3$ und der von ihr hygroskopisch gebundenen Wassermenge zusammen.

Tabelle 1.

1 Relative Feuchtigkeit im Nebel (%)	2 Von $17,2 \text{ cm}^3$ Schwefelsäure gebundene Wassermenge (cm^3)	3 Von $16,7 \text{ cm}^3$ Nebelsäure der Luft entzogene Wassermenge (cm^3)	4 erzeugte Nebelmenge (cm^3)
40	34	40	51
50	41	47	58
60	50	56	67
70	63	69	80
80	86	92	103
85	108	114	125
90	149	155	166
95	258	264	275
96	320	326	337
97	413	419	430
98	576	582	593
99	1128	1134	1145

Entsprechend dem Kurvenverlauf in Abb. 2 steigert sich die Menge der Nebelflüssigkeit bei zunehmender relativer Feuchtigkeit in immer stärkerem Masse. Es verdoppelt sich die Flüssigkeitsmenge jeweils zwischen 40 und 80 %, 80 und 93 %, 93 und 96,8 %, 96,8 und 98,6 %.

D. Die Feuchtigkeitsverhältnisse im künstlichen Nebel.

Es erhebt sich die Frage, in welchem Maße sich der Wasserentzug auf die Feuchtigkeitsverhältnisse der nebelhaltigen Luft auswirkt. Vier Faktoren sind dabei stets gekoppelt: Nebelsäuremenge, Nebelvolumen, relative und absolute Feuchtigkeit. An Stelle der absoluten Feuchtigkeit kann auch die Temperatur in Verbindung mit der relativen Feuchtigkeit gesetzt werden. Die Menge des Wasserdampfes, die die Luft bei Sättigung aufzunehmen vermag, ist von der Temperatur abhängig. Die relative Feuchtigkeit gibt die Menge des in der Luft vorhandenen Wasserdampfes in Prozenten der Sättigungsmenge an. Also ist durch Temperatur und relative Feuchtigkeit auch die absolute Feuchtigkeit bestimmt.

Einige Zahlenbeispiele sind am besten geeignet, um die Abhängigkeiten aufzuzeigen. Den Berechnungen in Tabelle 2 wurde die Annahme zugrunde gelegt, daß die in einer Sekunde versprühte Nebelsäuremenge von $16,7 \text{ cm}^3$ sich auf ein Volumen von 7200 m^3 verteilt, ein Raum, den der von einem Gerät erzeugte Nebel bei einer vertikalen Mächtigkeit von 30 m, einer Windgeschwindigkeit von 4 m/sek und einem Abstand der Nebelgeräte von 60 m einnimmt. Ferner wurde eine konstante Temperatur von 15° Celsius angenommen; die absolute Feuchtigkeit bei Sättigung beträgt dann $12,8 \text{ g/m}^3$. Als Ausgangspunkt für die Berechnung diente die relative Feuchtigkeit in der nebelhaltigen Luft; aus der absoluten Feuchtigkeit und der aus der Luft entzogenen Wassermenge ließen sich die ursprüngliche absolute und relative Feuchtigkeit berechnen.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, bleibt bei Feuchtigkeitswerten unter 80% die Veränderung geringer als 0,1%. Eine Herabsetzung der relativen Feuchtigkeit von mehr als 0,25% tritt erst bei Werten ein, die über 94 % liegen. Eine relative Feuchtigkeit von 99 % kann bei den angenommenen Bedingungen im künstlichen Nebel nicht mehr erreicht werden, es sei denn, daß der Luft Wasserdampf zugeführt würde. Daraus ist weiter zu folgern, daß die Bildung natürlichen Nebels nicht durch künstlichen Nebel ausgelöst werden kann. Sobald Wasser aus der Luft ausgeschieden wird, entfernt sie sich von der Dampfsättigung und damit von der Nebelbereitschaft. Es soll damit nicht die Möglichkeit bestritten werden, daß eine Luftmenge, in der künstlicher Nebel infolge geringer relativer Feuchtigkeit und starker Verteilung nicht mehr in Erscheinung tritt, bei Mischung mit sehr feuchter

Tabelle 2. Änderung der Feuchtigkeitsverhältnisse durch künstlichen Nebel. Temperatur 15°C, absolute Feuchtigkeit bei Sättigung 12,8 g/m³. Versprühte Nebelsäuremenge 16,7 cm³. Nebelvolumen 7200 m³.

Relat. Feuchtigkeit im Nebel %	Absol. Feuchtigkeit im Nebel g/m ³	Gebundene Wasserm. g/m ³	Absol. Feuchtigkeit vor dem Nebeln g/m ³	Relat. Feuchtigkeit %
40	5,12	0,0056	5,1256	40,04
50	6,40	0,0065	6,4065	50,05
60	7,68	0,0077	7,6877	60,06
70	8,96	0,0095	8,9695	70,075
80	10,24	0,0128	10,2528	80,10
85	10,88	0,0159	10,8959	85,124
90	11,52	0,0215	11,5415	90,17
91	11,648	0,0228	11,6708	91,179
92	11,776	0,0245	11,8005	92,191
93	11,904	0,0272	11,9312	93,212
94	12,032	0,0307	12,0627	94,24
95	12,16	0,0366	12,1966	95,28
96	12,288	0,0452	12,3332	96,337
97	12,406	0,0581	12,4641	97,454
98	12,564	0,0808	12,6448	98,63
99	12,672	0,1575	12,8295	100,23

Tabelle 3. Wie Tabelle 2. Nebelvolumen 3600 m³.

Relat. Feuchtigkeit im Nebel %	Absol. Feuchtigkeit im Nebel g/m ³	Gebundene Wasserm. g/m ³	Absol. Feuchtigkeit Vor dem Nebeln g/m ³	Relat. Feuchtigkeit %
40	5,12	0,0112	5,1312	40,09
50	6,40	0,0130	6,4130	50,10
60	7,68	0,0154	7,6954	60,12
70	8,96	0,0190	8,9790	70,15
80	10,24	0,0255	10,2655	80,20
85	10,88	0,0318	10,9118	85,24
90	11,52	0,0430	11,563	90,33
91	11,648	0,0456	11,6936	91,35
92	11,776	0,0490	11,825	92,39
93	11,904	0,0544	11,9584	93,42
94	12,032	0,0614	12,0934	94,47
95	12,16	0,0732	12,2332	95,56
96	12,288	0,0904	12,3784	96,71
97	12,406	0,1162	12,5222	97,83
98	12,564	0,1616	12,7256	99,42
99	12,672	0,3150	12,987	101,46

Tabelle 4. Wie Tabelle 3. Temperatur 3°C, Absolute Feuchtigkeit bei Sättigung 5,9 g/m³.

Relat. Feuchtigkeit im Nebel %	Absol. Feuchtigkeit g/m ³	Gebundene Wasserm. g/m ³	Absol. Feuchtigkeit vor dem Nebeln g/m ³	Relat. Feuchtigkeit. %
40	2,36	0,0112	2,3712	40,19
50	2,95	0,0130	2,9630	50,22
60	3,54	0,0154	3,5554	60,26
70	4,13	0,0190	4,1490	70,32
80	4,72	0,0255	4,7455	80,43
85	5,015	0,0318	5,0468	85,54
90	5,31	0,0430	5,3530	90,73
91	5,369	0,0456	5,4146	91,77
92	5,428	0,0490	5,477	92,83
93	5,487	0,0544	5,5414	93,92
94	5,546	0,0614	5,6074	95,04
95	5,605	0,0732	5,6782	96,24
96	5,664	0,0904	5,7544	97,53
97	5,723	0,1162	5,8392	98,96
98	5,782	0,1616	5,9436	100,74
99	5,841	0,3150	6,156	104,34

Tabelle 5. Wie Tabelle 3. Temperatur -10°C, absolute Feuchtigkeit bei Sättigung 2,2 g/m³.

Relat. Feuchtigkeit im Nebel %	Absol. Feuchtigkeit g/m ³	Gebundene Wasserm. g/m ³	Absol. Feuchtigkeit vor dem Nebeln g/m ³	Relat. Feuchtigkeit. %
40	0,88	0,0112	0,8912	40,51
50	1,10	0,0130	1,1130	50,59
60	1,32	0,0154	1,3354	60,70
70	1,54	0,0190	1,559	70,86
80	1,76	0,0255	1,7855	81,16
85	1,87	0,0318	1,9018	86,44
90	1,98	0,0430	2,023	91,95
91	2,002	0,0456	2,0476	93,07
92	2,024	0,0490	2,073	94,23
93	2,046	0,0544	2,1004	95,47
94	2,068	0,0614	2,1294	96,79
95	2,09	0,0732	2,1632	98,33
96	2,112	0,0904	2,2024	100,11

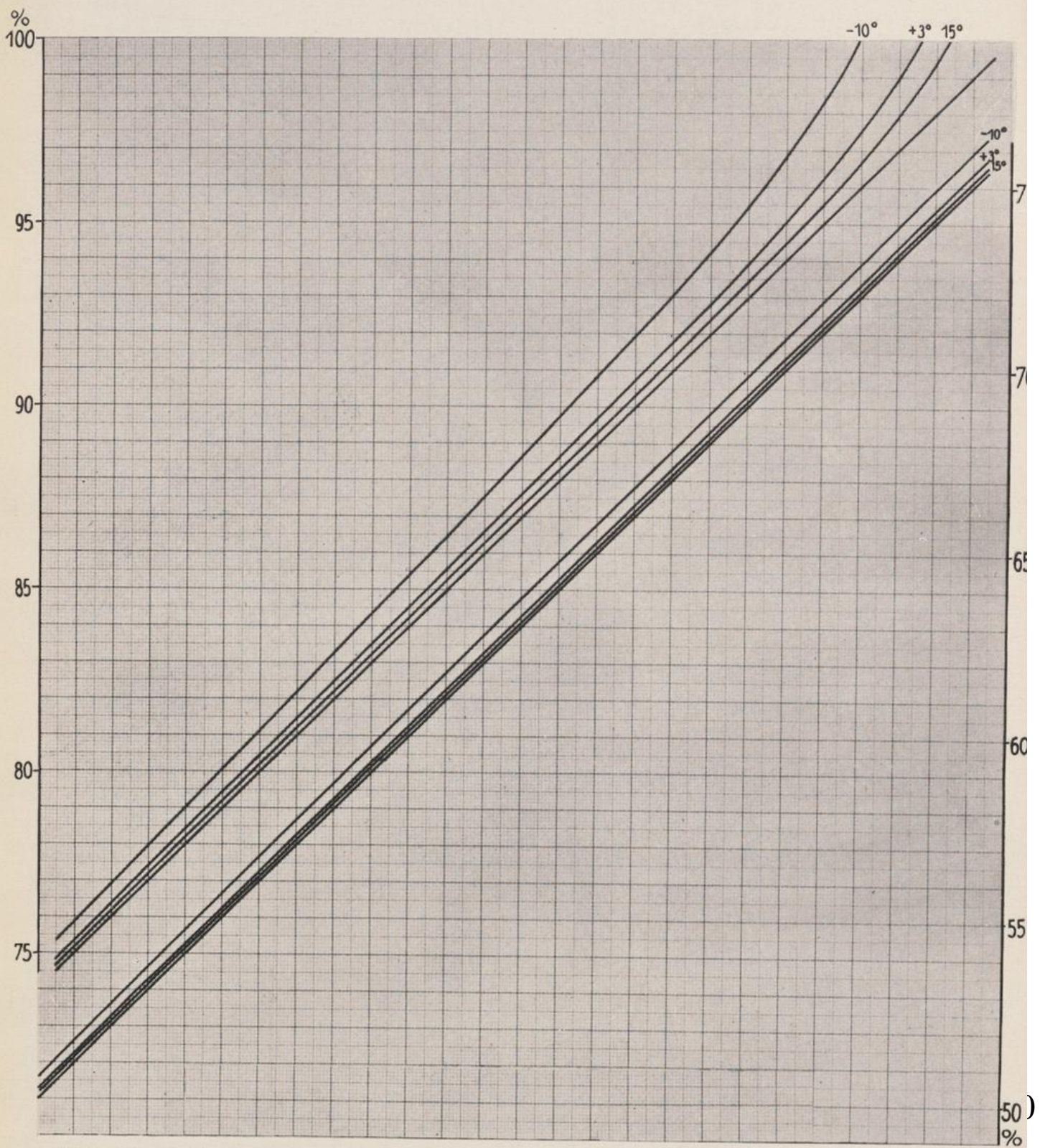


Abb. 6. Verminderung der relativen Feuchtigkeit bei 15° C, 3° C und - 10° C in einem Nebelvolumen von 3600 m³, das 17,2 cm³ Schwefelsäure enthält,

Luft oder bei Abkühlung eine Nebelbildung in einem größeren Gebiet auszulösen vermag, die natürlichen Nebel vortäuscht.

In Tabelle 2 und 3 werden Nebelvolumen miteinander verglichen, die im Verhältnis 2:1 stehen. Wie zu erwarten, ist die Verminderung der relativen Feuchtigkeit dem Nebelvolumen umgekehrt proportional. Diese Regel gilt für Feuchtigkeitswerte unter 95%.

Über den Einfluss der absoluten Feuchtigkeit bzw. der Temperatur auf die Feuchtigkeitsverhältnisse im künstlichen Nebel gestatten die Tabellen 3, 4 und 5 einen zahlenmäßigen Vergleich. Sie sind für gleiche mengenmäßige Bedingungen, aber verschiedene Temperaturen (15°C, 30°C und -10°C) berechnet; die Sättigungsmengen des Wasserdampfes betragen 12,8 bzw. 5,9 und 2,2 g/m³.

Abbildung 6 enthält die Werte der Tabellen 3 bis 5 in graphischer Darstellung. Die Verminderung der relativen Feuchtigkeit entspricht jeweils dem Abstand zwischen den für die drei verschiedenen Temperaturen gezeichneten Kurven und der Meßgeraden. Von Feuchtigkeitswerten über 95% abgesehen bewirkt der Wasserentzug nur bei tiefer Temperatur und entsprechend geringer absoluter Feuchtigkeit eine merkliche Trocknung der nebelhaltigen Luft. So wird bei -10°C die relative Feuchtigkeit von 40% auf 39,5% herabgesetzt. Die Trocknung erreicht 1% bei 75%, 2% bei 92% und 3% bei 97,5% relativer Feuchtigkeit.

Eine besonders starke Austrocknung erfährt die Luft in der Nebelfahne, solange diese noch ein sehr geringes Volumen einnimmt. Mit ihrer Ausbreitung steigt die relative Feuchtigkeit wieder an; gleichzeitig nehmen auch Wassergehalt und Größe der Nebeltröpfchen zu.

Dass eine geringe absolute Feuchtigkeit nur von unbedeutendem Einfluss auf die Dichte des künstlichen Nebels ist, wird in anderem Zusammenhange gezeigt werden (Seite 23).

E. Die Anzahl der Tröpfchen im künstlichen Nebel.

Die Bestimmung der Größe der Nebeltröpfchen und ihres Anteils an reiner Schwefelsäure ermöglicht es, die Teilchenzahl im künstlichen Nebel zu berechnen. Bei einer relativen Feuchtigkeit von 70 % beträgt der Radius eines Nebeltröpfchens $0,5 \cdot 10^{-3}$ mm,

sein Volumen also rund $0,5 \cdot 10^{-9} \text{mm}^3$. $1/5$ dieses Volumens entfällt auf Schwefelsäure. Bei der Verwendung einer Düse mit einer Leistung von 11 in der Minute werden mithin $1,72 \cdot 10^{14}$ Nebeltröpfchen gebildet, die sich auf das in der Zeiteinheit eingenommene Nebelvolumen verteilen. Bei einer Raumerfüllung von 6000 m^3 (Wind 5 m/sec, Mächtigkeit der Nebelschicht 20 m, Abstand der Nebelfässer 60 m) entfallen auf 1 cm^3 rund 30 000 Nebeltröpfchen. Infolge der unterschiedlichen Ausbreitung des Nebels und der Verwendung verschiedener Düsen schwankt die in der Raumeinheit enthaltene Zahl der Nebeltröpfchen innerhalb weiter Grenzen.

Die Tropfenzahl im künstlichen Nebel ist außerordentlich groß im Vergleich zu der im natürlichen Nebel festgestellten Anzahl. H o u g h t o n und R a d f o r d (1938) fanden eine Schwankung zwischen 1,36 und 5,97 Teilchen im cm^3 . Andererseits wurden bei der Nachbildung von Quellwolken rund 10 000 Tröpfchen im cm^3 gefunden (F i n d e i s e n , 1938).

3. Die Abhängigkeit der Erscheinungsform des künstlichen Nebels von den meteorologischen Bedingungen.

Die Gestalt einer Nebelfahne macht die Strömungsverhältnisse in der bodennahen Luftschicht sichtbar. Die Eigenschaften des Windes, seine Schwankungen in Stärke und Richtung sowie seine vertikale Komponente prägen sich in der Erscheinungsform des Nebels aus. Die vertikale Versetzung der Luft hat zwei Ursachen: die dynamische und die thermische Turbulenz. Der zweite Anteil ist unserer Messung bis zu einem gewissen Grade zugänglich, in dem man die Temperaturschichtung in Bodennähe feststellt.

Es wurde eine Anzahl von Versuchen durchgeführt, um das Aussehen des Nebels mit meteorologischen Messungen in der bodennahen Luftschicht in Beziehung zu bringen. Zur Bestimmung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit in den Höhen 2 m, 8 m und 16 m diente ein Aspirationspsychrometer mit Umkippthermometern. Die Windstärke wurde in 2 m und 16 m Höhe gemessen. Die von einem Faßnebelgerät erzeugte Nebelfahne wurde in einer Reihe von Lichtbildern festgehalten.

Im folgenden wird eine Anzahl solcher Versuche zusammen mit den meteorologischen Daten und Lichtbildern beschrieben.

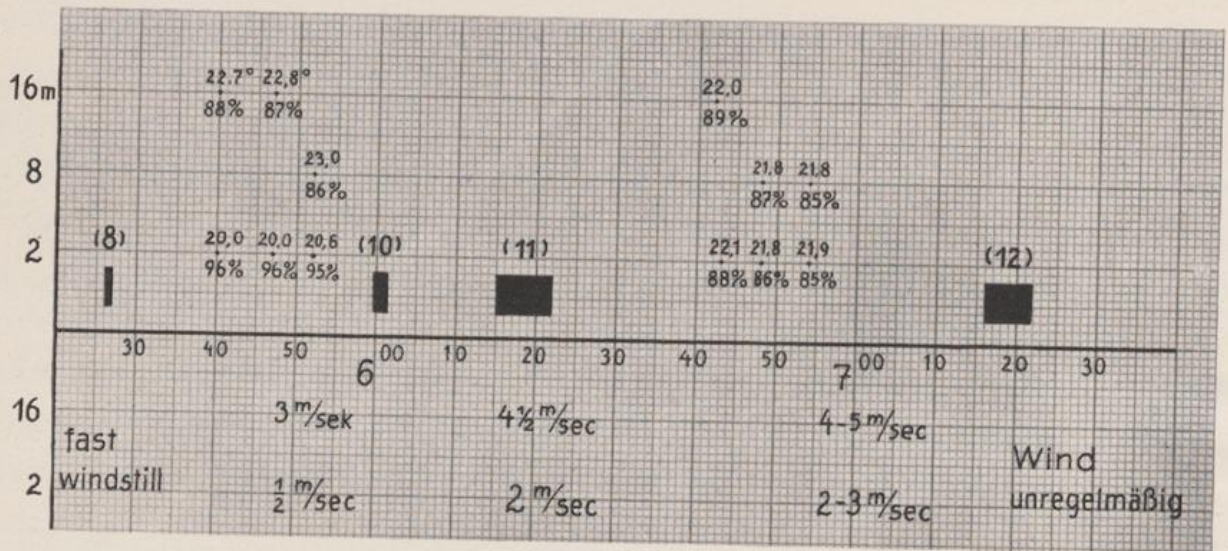


Abb. 7. Übersicht über die meteorologischen Messungen zu den Versuchen Abb. 8—12.

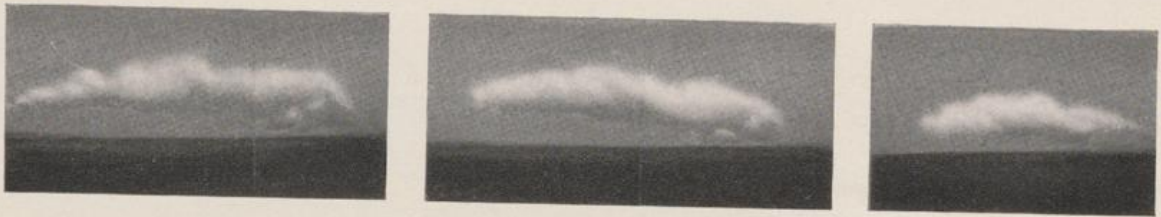


Abb. 8. Nebelfahne bei Inversion und nahezu Windstille.

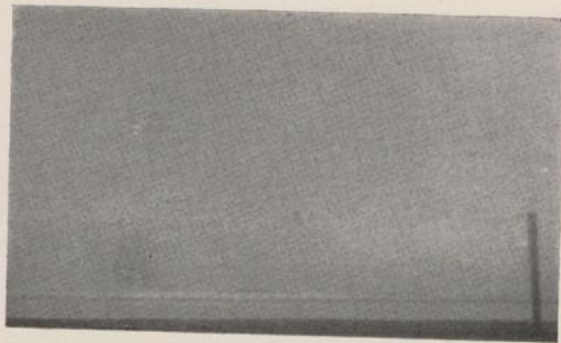


Abb. 9. Die Nebelfahne von Abb. 8 nach 30 Minuten als breite, flache Nebelbank.

Einige Gruppen von Versuchen sind in ihrem zeitlichen Zusammenhange dargestellt, wobei die Änderungen der meteorologischen Verhältnisse in der Ausprägung des Nebels zum Ausdruck kommen. Im übrigen ist bei der Anordnung der Versuche die Windstärke zugrunde gelegt; es werden zunächst die Versuche bei schwachem Wind bis etwa 3 m/sek - beschrieben.

Wie stark sich die Erscheinungsform einer Nebelfahne innerhalb ganz kurzer Zeit verändern kann, zeigt eine Versuchsreihe vom 3. August. In der Zeit von 5,26 bis 7,16 Uhr wurden vier Versuche bei jeweils andersartigen meteorologischen Verhältnissen durchgeführt. Eine Übersicht über die Versuchszeiten, sowie die Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windmessungen gibt Abb. 7. Aus dieser wie aus den folgenden entsprechenden Darstellungen lässt sich Uhrzeit und Dauer jedes Versuches aus der Breite des schwarzen Blockes entnehmen. Die jeweils in Klammern beigegefügte Zahl gibt die Nummer der Abbildung an, in welcher der betreffende Versuch dargestellt ist.

Nach einer klaren Nacht hatte sich eine kräftige Inversion ausgebildet. Heranziehende Gewitterbewölkung liess die Sonne nur für kurze Zeit zwischen Wolken erscheinen und verhinderte eine starke Einstrahlung. Plötzlich aufkommender Wind glich die Temperaturunterschiede in der bodennahen Luftschicht aus. Während des Versuches Abb. 12, als das Gewitter bereits über das Versuchsgelände zog und einzelne Regentropfen fielen, wechselte zeitweise Windstille mit Wind von geringer Stärke ab.

Im einzelnen ist zu den Versuchen zu bemerken: (Abb.8) : Es wurde eine Minute lang genebelt. Da nur ein ganz geringer, stetiger Wind wehte, bildete der Nebel eine dicke Walze, die sich langsam nach SSO bewegte. Bei der hohen Luftfeuchtigkeit erschien der Nebel dicht und weiß. Er hatte scharfe Umrisse. Einzelne Wülste ließen eine schwache Luftbewegung in der Nebelfahne erkennen. Der Nebel erreichte kurz hinter der Ablaßstelle eine Höhe von etwa 15 m, die er beim Abziehen als Obergrenze beibehielt. Noch nach 30 Minuten war der Nebel in der Ferne als breite, flache Bank deutlich wahrnehmbar (Abb. 9).

Um 5,59 Uhr wurde wieder 2 Minuten lang genebelt (Abb.10). Die Windmessung um 5,50 Uhr ergab in 16 m Höhe eine Geschwindigkeit von 3 m/sec, in 2 m Höhe $\frac{1}{2}$ m/sec. Die Lichtbilder wurden von einem 10 m hohem Turm 500 m von der Nebelstelle entfernt aufgenommen. Noch entspricht das Aussehen des Nebels dem des vorigen Versuches, wenn er auch bereits rascher abzieht und seine Umrisse schon den Einfluss des leichten Windes erkennen lassen.

Völlig anders sieht jedoch der Nebel im nächsten Versuch aus (Abb.11). In der kurzen Zeit zwischen den beiden Versuchen war eine schwache Brise aufgekommen, was den Anlaß gab, um 6,15 Uhr nochmals zu nebeln. Während des Versuches wurde in 16 m Höhe eine Windgeschwindigkeit von $4\frac{1}{2}$ m/sec, in 2 m Höhe 2 m/sec gemessen. Die Nebelfahne zieht als einheitliche Masse schnell ab und liegt dem Boden auf. Ihre Oberfläche ist gleichmäßig, wenn auch vom Winde etwas zerrissen. Wülste, wie sie besonders in Abb. 8 zu beobachten waren, können unter dem Einfluß des Windes nicht mehr entstehen. Die Erscheinungsform der Nebelfahne spiegelt die meteorologischen Windverhältnisse wieder: Der Wind hatte die Inversion zerstört und die Temperaturverschiedenheiten in Bodennähe ausgeglichen. Er wehte recht stetig, sodaß sich über dem ebenen Versuchsgelände eine laminare Strömung einstellte.

Unregelmäßig wehender Wind kennzeichnet die Bedingungen in Versuch Abb.12. Zeitweise war es fast windstill, dann setzte wieder leichter Wind ein. Dementsprechend hat auch die Nebelfahne ein ungleichmäßige Aussehen; ihre Erscheinungsform stellt einen Übergang dar zu dem bei böigem Wind beobachteten Typus. Einzelne Teile des Nebels steigen hoch, beim nächsten Windstoß wird die ganze Nebelfahne seitlich versetzt. Sie reißt aber nicht ab, sondern bleibt noch immer im Zusammenhange.

Ein weiteres Beispiel, in dem zwei nur 20 Minuten nacheinander durchgeführte Versuche ein gänzlich verschiedenes Aussehen zeigen, bietet eine Versuchsreihe vom 28. Juli. Wieder hatte sich während der Nacht eine kräftige Inversion ausgebildet, die Bodennebel in den Wiesen verursachte. Nach Sonnenaufgang verstärkte sich der Nebel für kurze Zeit, geriet dann in Bewegung und löste sich auf. Der Himmel war von einem Cirrostratusschleier überzogen, sodaß die Einstrahlung zunächst ziemlich stark herabgesetzt war und sich die Inversion recht lange erhalten konnte. Der Wind war gering, nicht über 1 m/sec,



Abb. 10. Nebelfahne bei Inversion und geringem Wind.

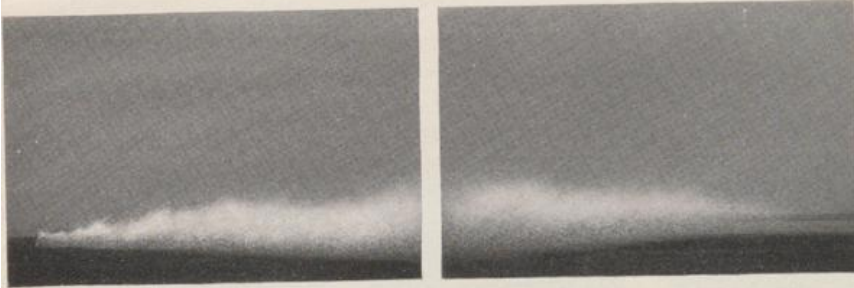


Abb. 11. Nebelfahne bei Iso-
thermie und leichtem
Wind.

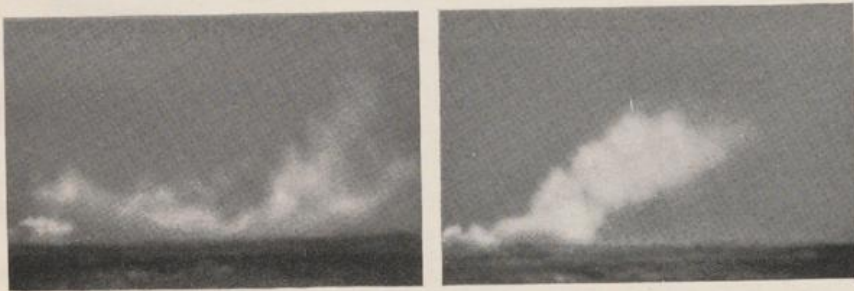


Abb. 12. Nebelfahne
bei unregelmäßigem
Wind.

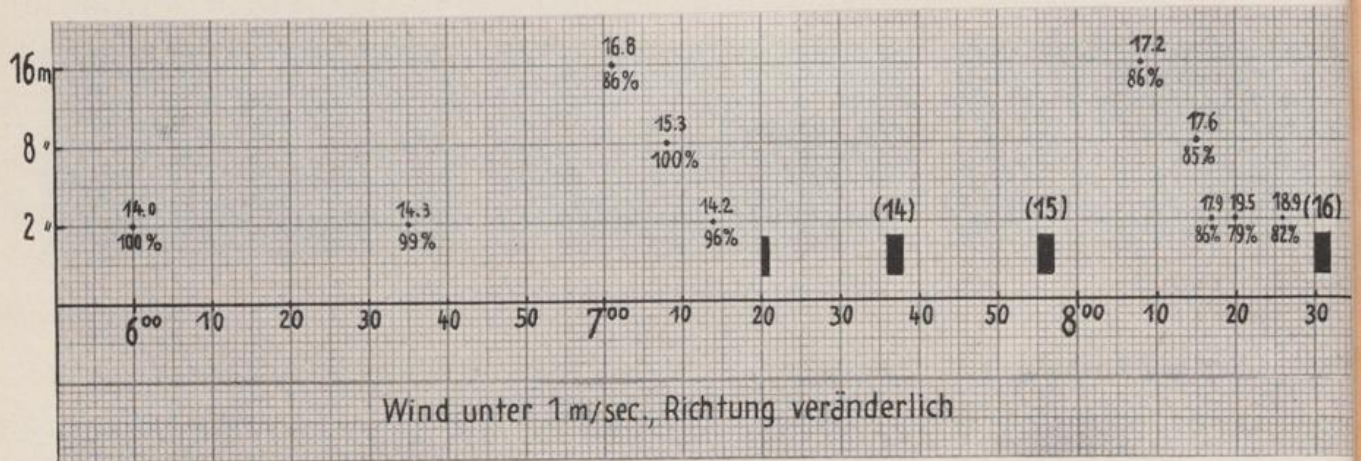


Abb. 13. Meteorologische Messungen zu den Versuchen Abb. 14—16.

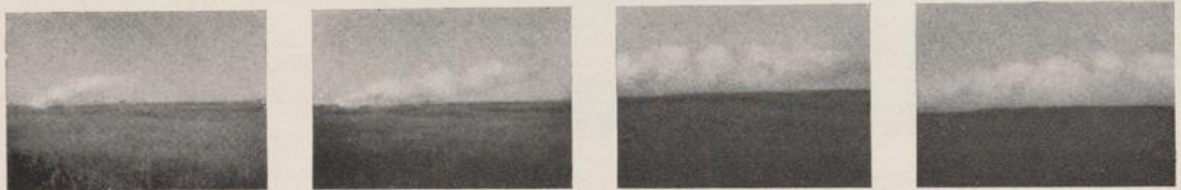


Abb. 14. Nebelfahne bei Inversion.

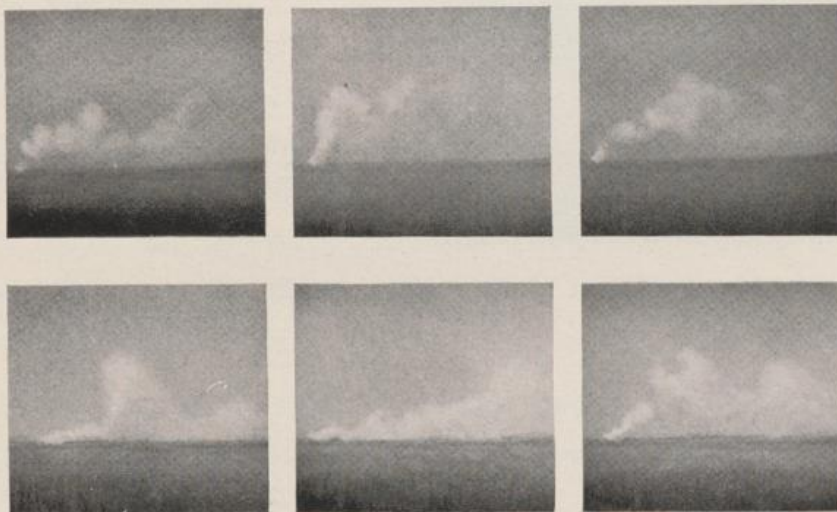


Abb. 15.

Nebelfahne bei labiler Schichtung der bodennahen Luft.

Abb. 16.

in der Richtung stark veränderlich. Über die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in der bodennahen Luftschicht und die Versuchszeiten unterrichtet Abb. 13.

Abb. 14 zeigt wieder das charakteristische Bild einer Nebelfahne bei Inversion. Walzenförmig und mit scharfer Abgrenzung bewegt sich die Nebelfahne langsam mit dem schwachen Wind davon. Noch ist die Luft stabil geschichtet, die Strömung weist noch keine vertikale Komponente auf. Diese Verhältnisse änderten sich in der kurzen Zeit bis zum nächsten Versuch (Abb. 15). Daß Aufbäumen der Nebelfahne, von der einzelne Teile cumulusartig aufsteigen, zeigt an, daß die Inversion zerstört ist und die Schichtung einen ausgeprägt labilen Charakter angenommen hat. Durch die Einstrahlung hat sich die Luft am Boden stark erwärmt und beginnt in einzelnen Blasen emporzusteigen. Kältere Luft sinkt herunter und nimmt die Stelle der emporgehobenen Luftblasen ein. Die bodennahe Luft ist auf engbegrenztem Raum in einem Stadium auf- und absteigender Strömungen. Abb. 16 gibt einige Bilder von einem kurze Zeit später durchgeführten Versuch wieder, die keinen Unterschied gegen den vorhergehenden aufweisen.

Schwacher Wind - in 16 m Höhe wurden $2\frac{1}{2}$ bis $3\frac{1}{2}$ m/sec gemessen - und stark aufsteigende Luftbewegung geben der Erscheinungsform des Nebels in den Versuchen Abb. 18 und 19 das Gepräge. Der Temperaturgang weist vor den Versuchen eine ziemliche Unruhe auf, wie sie für die bodennahe Luft bei starkem Vertikalaustausch bezeichnend ist. (vgl. Abb. 17). Bei den Messungen, die 40 Minuten nach den Versuchen durchgeführt wurden, war infolge der verminderten Einstrahlung am Abend bereits eine wesentliche Beruhigung im Temperaturverlauf festzustellen. Die Nebelfahne ist völlig uneinheitlich sie zergliedert sich in einzelne Ballen, die zum Teil turmartig in die Höhe steigen (Abb. 18 und 19). In kurzer Entfernung von dem Nebelgerät hat sich die gesamte Nebelfahne vom Boden gelöst. Die letzte Steigerung dieser Versuchsbedingungen wurde am 2. September angetroffen. Schlierenbildung in der Luft zeigte die starke Überhitzung in Bodennähe an, der Himmel war mit aufgetürmten Cumuluswolken bedeckt. Der Wind schwankte sehr in Richtung und Stärke, Windstille wechselte mit leisem Zug ab. Der Nebel stieg

ballenförmig in die Höhe (Abb. 20), die Nebelfahne löste sich sehr rasch vom Boden, die Entfernung blieb unter 300 m. Der steil aufsteigende künstliche Nebel löste unmittelbar über dem Versuchsgelände die Bildung mächtiger Cumuluswolken aus. Abb. 20 gibt Einzelaufnahmen von mehreren Versuchen des Vormittags wieder.

Das gemeinsame Merkmal aller bisher beschriebenen Versuche ist die geringe Windstärke, die die Voraussetzung für die gegensätzliche Luftschichtung und damit für das verschiedenartige Aussehen des Nebels in den Versuchen Abb. 8 und 20 darstellt.

Stärkerer Wind wirkt sich naturgemäß auf die Längenerstreckung der Nebelfahne aus. Die Gestaltung im einzelnen hängt wieder von dem vertikalen Anteil der Luftströmung und der Böigkeit des Windes ab.

Mäßiger Wind, geringer Temperaturabfall und hohe Luftfeuchtigkeit geben einer Versuchsreihe vom 31. Juli das Gepräge. Die meteorologischen Daten und die Versuchszeiten sind der Abb. 21 zu entnehmen. Der Bodennebel hatte sich bereits aufgelöst, die Temperaturen in der bodennahen Luftschicht waren recht gleichmäßig. Den Himmel bedeckten zunächst einzelne Cirren, die sich später fast über den ganzen Himmel ausbreiteten, außerdem bildeten sich Altocumuli und einzelne Schönwettercumuli.

In Versuch Abb. 22 zog der Nebel bei geringem Wind als dichte, geschlossene Fahne ab, die eine Höhe von etwa 20 m erreichte. Die Seiten- und Höhenausbreitung der Nebelfahne wird besonders gut in einem kurze Zeit später durchgeführten Versuch veranschaulicht (Abb. 23). Der Nebel kam genau auf den Beobachter zu, der etwa 600 m von dem Nebelgerät entfernt stand. Die beiden Aufnahmen zeigen, wie sich die Nebelfahne auflockert. Auf dem ersten Bild zeigt der Nebel in Frontalansicht noch einen scharfen Umriss, auf dem zweiten Bilde ist dieser schon verschwommen. Die Nebelfahne bleibt aber im Zusammenhang, sie zerflattert nicht. Die zweite Aufnahme wurde gemacht, als die Nebelfahne 350 m von dem Gerät entfernt einen mit Telefonstangen im Abstand von 50 m besetzten Weg überschritten hatte. Dadurch lassen sich die Ausmaße der Nebelfahne bestimmen: sie war etwa 100 m breit und 60 m hoch.

Wenn ein Vergleich der Versuche Abb. 22 und 23 schon eine Auflockerung des Nebels erkennen läßt, so tritt diese in den beiden folgenden Versuchen noch deutlicher in Erscheinung (Abb. 24, 25).

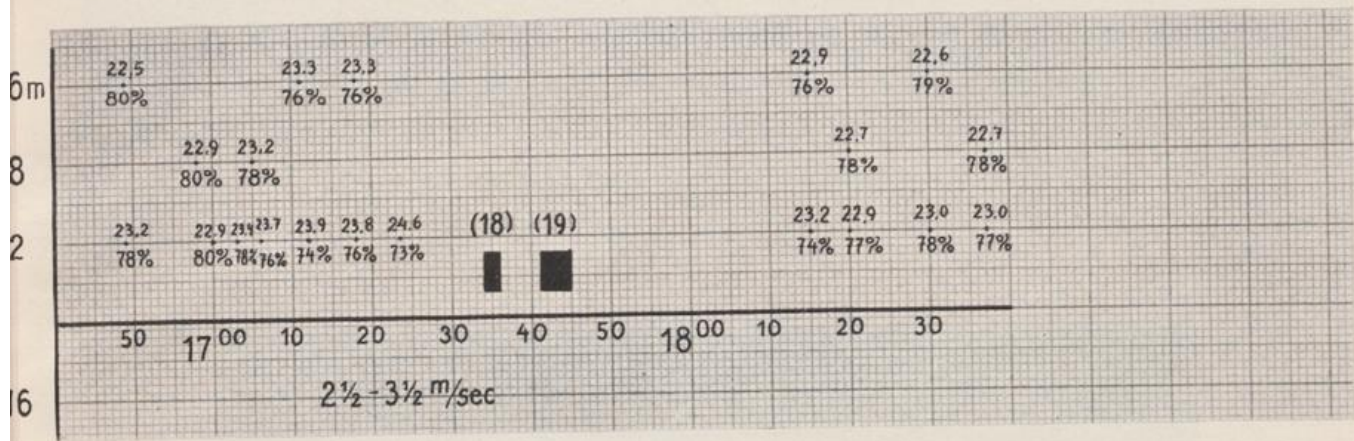


Abb. 17. Meteorologische Messungen zu den Versuchen Abb. 18 und 19.

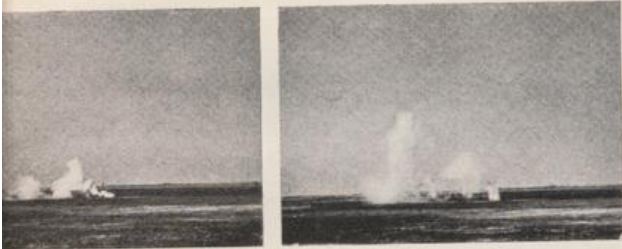


Abb. 18.

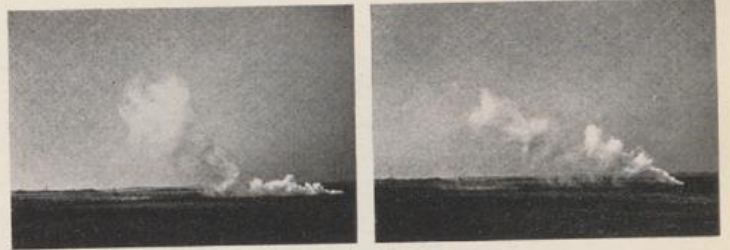


Abb. 19.

Nebelfahnen bei stark aufsteigender Luftströmung und geringem Wind.

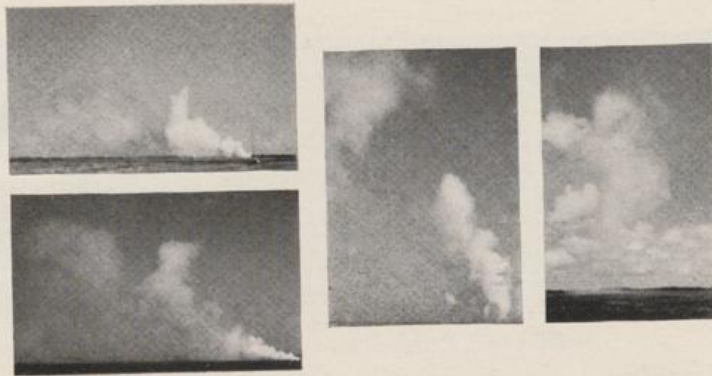
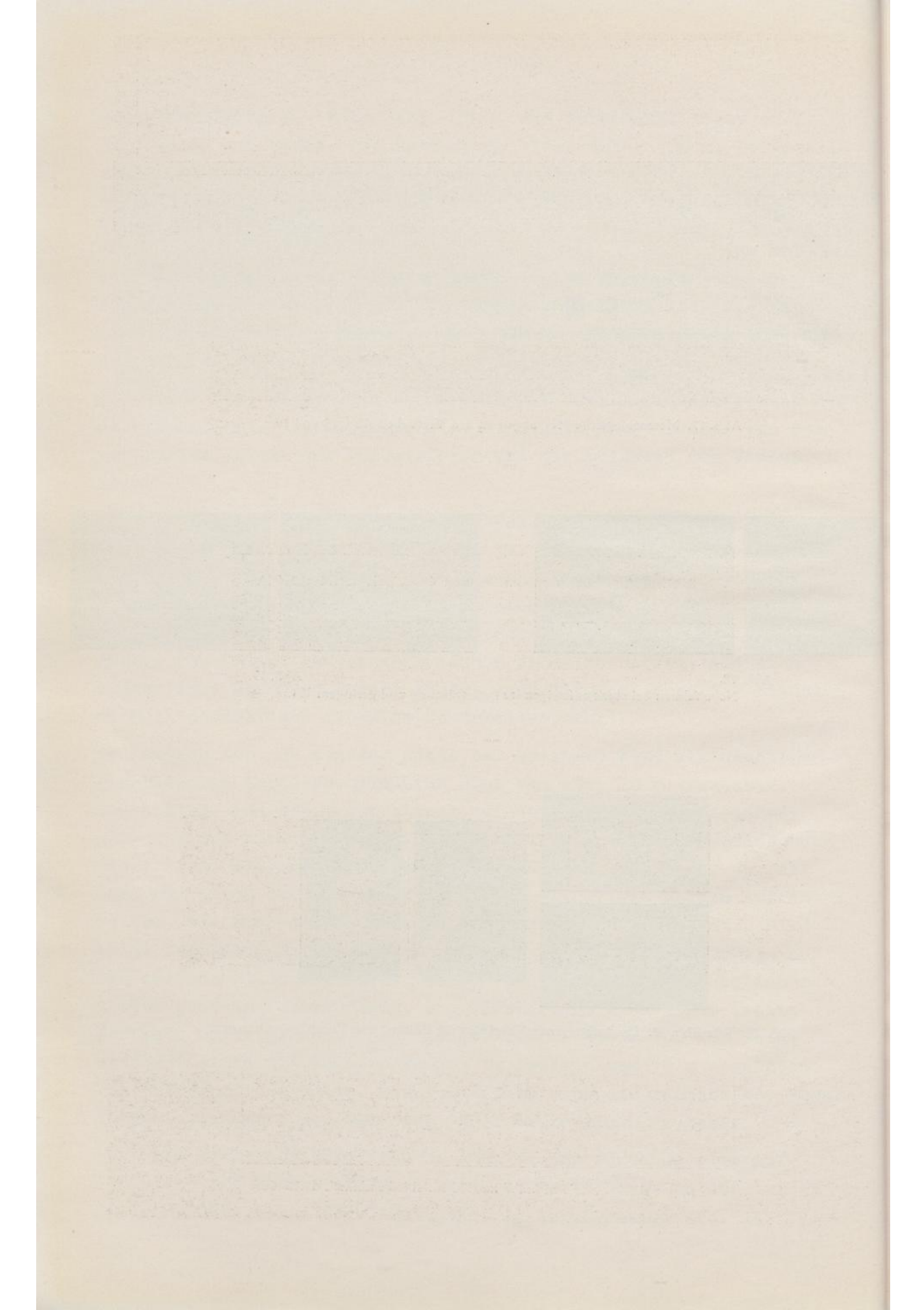


Abb. 20. Wie Abb. 19. Der aufsteigende Nebel löst die Bildung von Cumuluswolken aus.



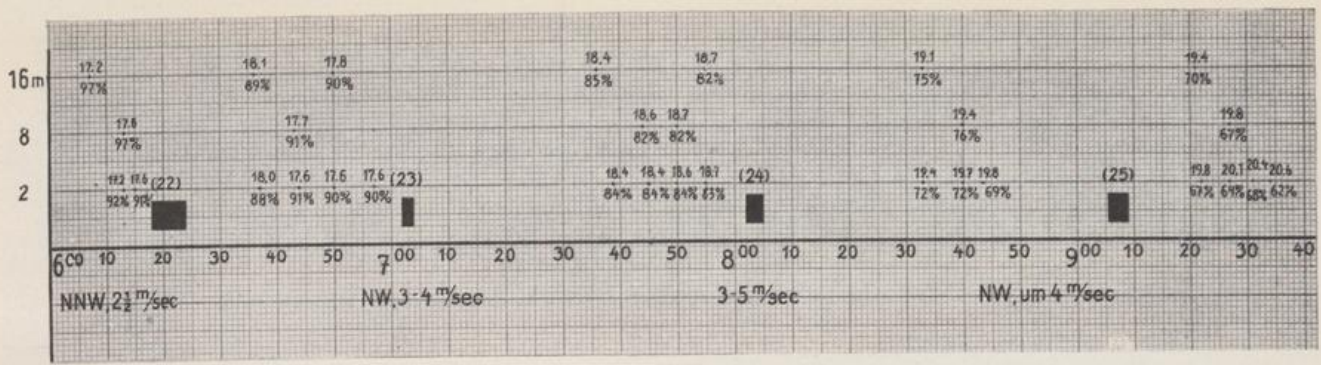


Abb. 21. Meteorologische Messungen zu den Versuchen Abb. 22—25.



Abb. 22. Niedrige, geschlossene Nebelfahne.



Abb. 23. Nebelfahne in Frontalansicht. Weitere Erklärung im Text.



Abb. 24. Aufgelockerte Nebelfahne.



Abb. 25. Nebelfahne bei leicht böigem Wind in einzelne Ballen aufgeteilt.



Abb. 26. Nebelfahne unter dem Einfluß des Windes schrägedrückt.

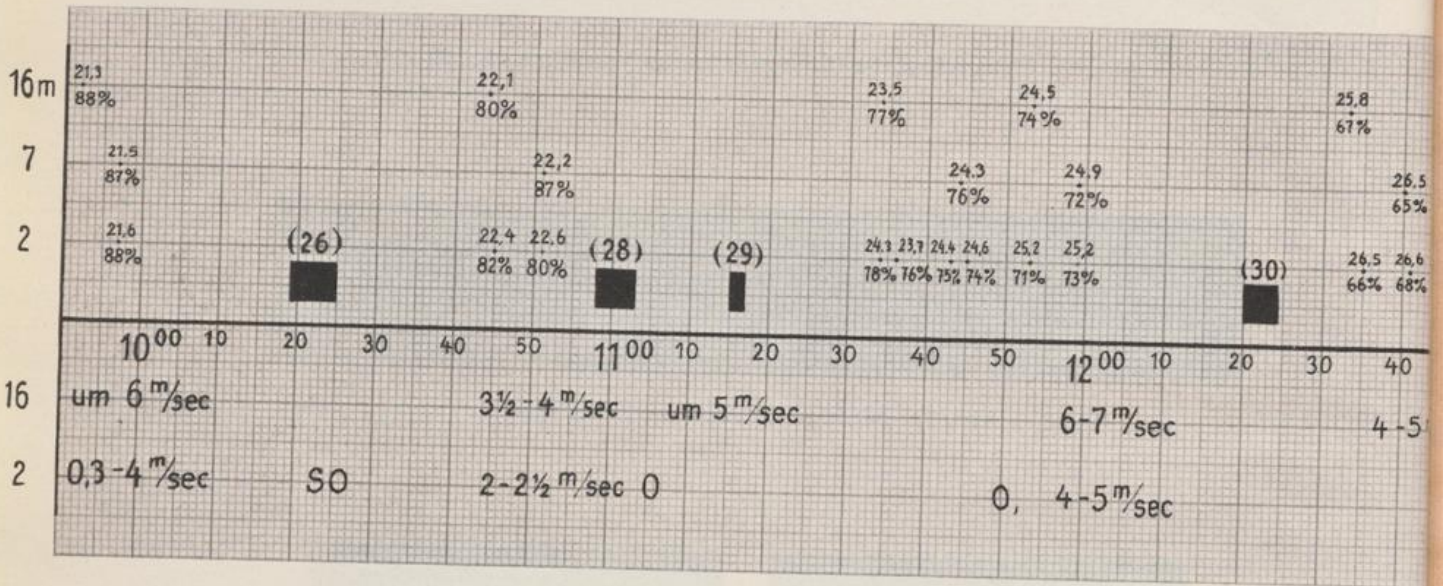


Abb. 27. Meteorologische Messungen zu den Versuchen Abb. 26, 28—30.



Abb. 28. Aufgelockerte Nebelfahne.



Abb. 29. Nebelfahne, von Luv aufgenommen.

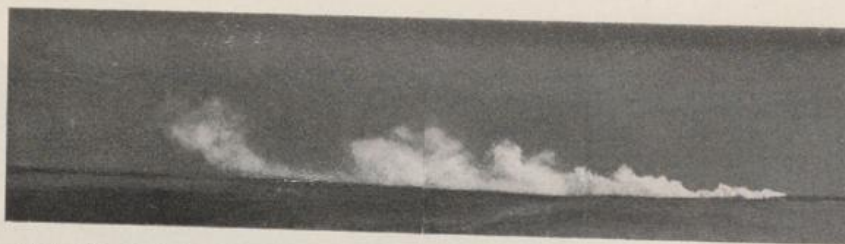


Abb. 30. Nebelfahne bei leicht böigem Wind in einzelne Teile zergliedert.

Die Zunahme des Windes auf $3 - 5 \text{ m/sec}$ und die Einstrahlung bedingen eine weitere Auflockerung des Nebels, der recht voluminös wird und aus dem sich bereits einzelne Ballen herauszugliedern beginnen.

Eine Aufteilung der Nebelfahne in einzelne Ballen bei leicht böigem Wind zeigt Abb. 25; hochragende Nebelwolken wechseln mit niedrigen Teilen ab, wodurch das Profil der Nebelfahne uneinheitlich wird.

Geringe Temperaturunterschiede in den drei Meßhöhen mit hoher relativer Feuchtigkeit und mäßig starkem Wind kennzeichnen den Versuch Abb. 26. Die Nebelfahne bleibt niedrig - sie erreicht 200 m hinter dem Gerät 30 m Höhe - und wird schnell vom Wind davongetragen. Der Wind macht die Umrisse der Nebelfahne verwaschen, deutlich zeigt die Abbildung, wie einzelne Nebelfetzen infolge der mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeit schrägedrückt werden.

Bei dem etwa $1/2$ Stunde später durchgeführten Versuch Abb. 28 hatten sich die meteorologischen Verhältnisse bereits geändert. Der Wind hatte vorübergehend etwas nachgelassen, außerdem war inzwischen die Sonne durchgekommen, was zu einer stärkeren Aufheizung des Bodens führte. Beides kommt unmittelbar in der Ausprägung der Nebelfahne zum Ausdruck, sie ist locker und zerrissen aber nicht in dem Maße windgekämmt wie im vorhergehenden Versuch.

In Abb. 29 wurde die abziehende Nebelwolke von Luv aus aufgenommen. Der Nebel breitete sich mit ziemlich scharfen Grenzen nach den Seiten und der Höhe aus; auch nach Abstellen des Gerätes blieb die Nebelfahne geschlossen und war in der Ferne als heller Fleck erkennbar.

Versuch 30 zeigt gegen die vorhergehenden wenig Unterschiede; das Auffrischen und die Böigkeit des Windes geben sich in der Erscheinungsform der Nebelfahne zu erkennen, die windgekämmt und in einzelne Teile zergliedert ist.

Mässiger Wind zusammen mit stark aufsteigender Luftbewegung bestimmen das Bild des Nebels in Versuch Abb. 32. Der Wind verhindert die Ausbildung scharfer Umrisse und treibt die Nebelfahne schnell weg. Die Nebelfahne ist aufgelockert; bei der geringen Feuchtigkeit zerflattern einzelne abgerissene Teile ähnlich wie

Lokomotivdampf, der sich auflöst. Kurz hinter dem Gerät wird der Nebel bereits so dünn und dunstig, daß er die horizontale Sicht nur noch wenig behindert. Wenige Minuten nach dem Abschalten des Gerätes war von dem Nebel nichts mehr zu erkennen.

Die bezeichnende Erscheinungsform des Nebels bei böigem Wind zeigt Versuch Abb. 33. Die Windgeschwindigkeit am Boden schwankte zwischen $2\frac{1}{2}$ und $4\frac{1}{2}$ m/sek, in 16 m Höhe zwischen 4 und $6\frac{1}{2}$ m/sek. Die Nebelfahne ist völlig zerrissen und in einzelne Wolken aufgeteilt. Der Nebel stieg stark hoch und erreichte in 1200 m Entfernung von dem Gerät eine Höhe von etwa 200 m. Noch 15 Minuten nach dem Abstellen des Gerätes war der Nebel als dünne Wolke in der Höhe zu erkennen.

Bei zwei Versuchen war Gelegenheit, die Vernebelung einer schmalen Fläche vom Flugzeug aus zu beobachten und dadurch die am Boden gemachten Aufnahmen durch Luftaufnahmen zu ergänzen. Es waren 3 Nebelgeräte im Abstand von 60 m senkrecht zur Windrichtung aufgestellt. Die Düsenleistung betrug 1 l/Min.

Bei dem in den Abb. 34 und 35 dargestellten Versuch war die Geschwindigkeit des böigen Windes in 16 m Höhe um 4 - 5 m/sec, die Feuchtigkeit etwa 60%. Der Himmel war zu 4/10 mit aufgetürmten Cumuluswolken bedeckt.

Die Bodenaufnahmen (Abb. 34) zeigen das für böigen Wind kennzeichnende Bild: die Nebelfahnen sind zerrissen, es können bereits kurz hinter den Geräten Lücken in den drei hintereinanderliegenden Nebelfahnen entstehen. Zugleich löst sich der Nebel schnell vom Boden ab und steigt stark in die Höhe, sodaß die Horizontalsicht nur wenig behindert wird. Mit dem Flugzeug wurde die Obergrenze des Nebels bei 300 m festgestellt.

Die Luftaufnahmen (Abb. 35) lassen die starke Richtungsböigkeit des Windes erkennen. Die drei Nebelfahnen sind nicht parallel untereinander, sondern weichen selbst bei dem geringen seitlichen Abstand von nur 60 m beträchtlich in ihrer Richtung ab. Es kommt daher nicht immer zu einem seitlichen Zusammenschluß der drei Nebelfahnen, sondern es bilden sich breite Lücken zwischen ihnen. Durch die Böigkeit des Windes in der Stärke werden die Nebelfahnen unterbrochen, der Nebel zergliedert sich in einzelne Wolken. Eine in so starkem Masse zerrissene und lückenhafte Nebeldecke setzt ihre Wirksamkeit stark herab. Aber auch bei gleichmässiger

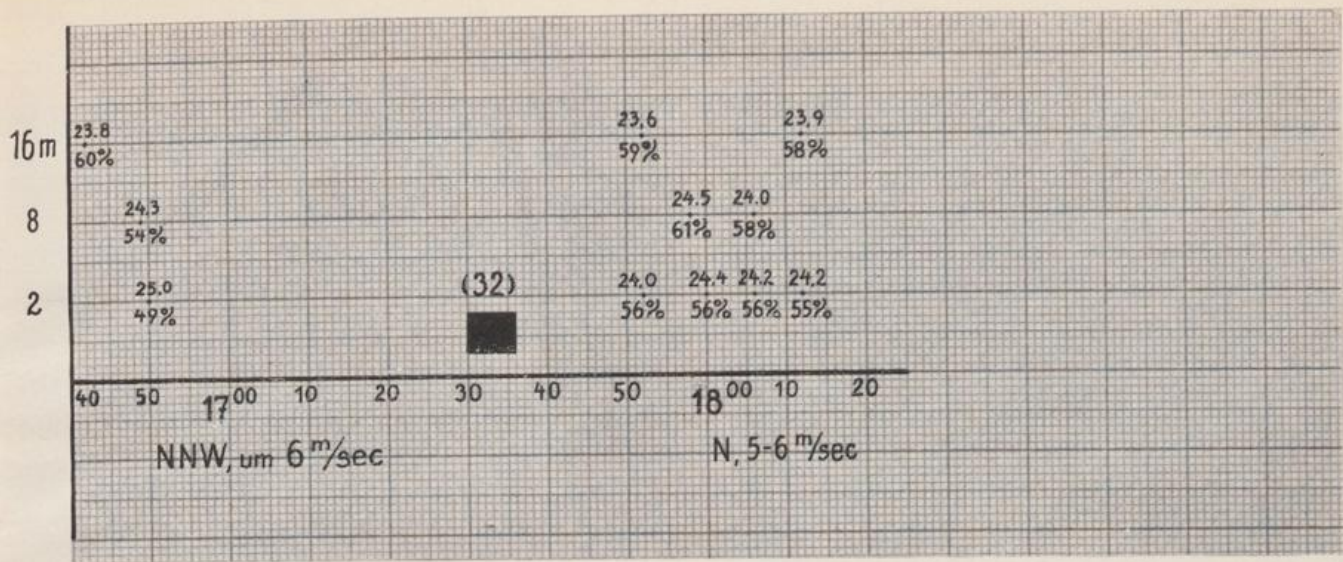


Abb. 31. Meteorologische Messungen zu Versuch Abb. 32.



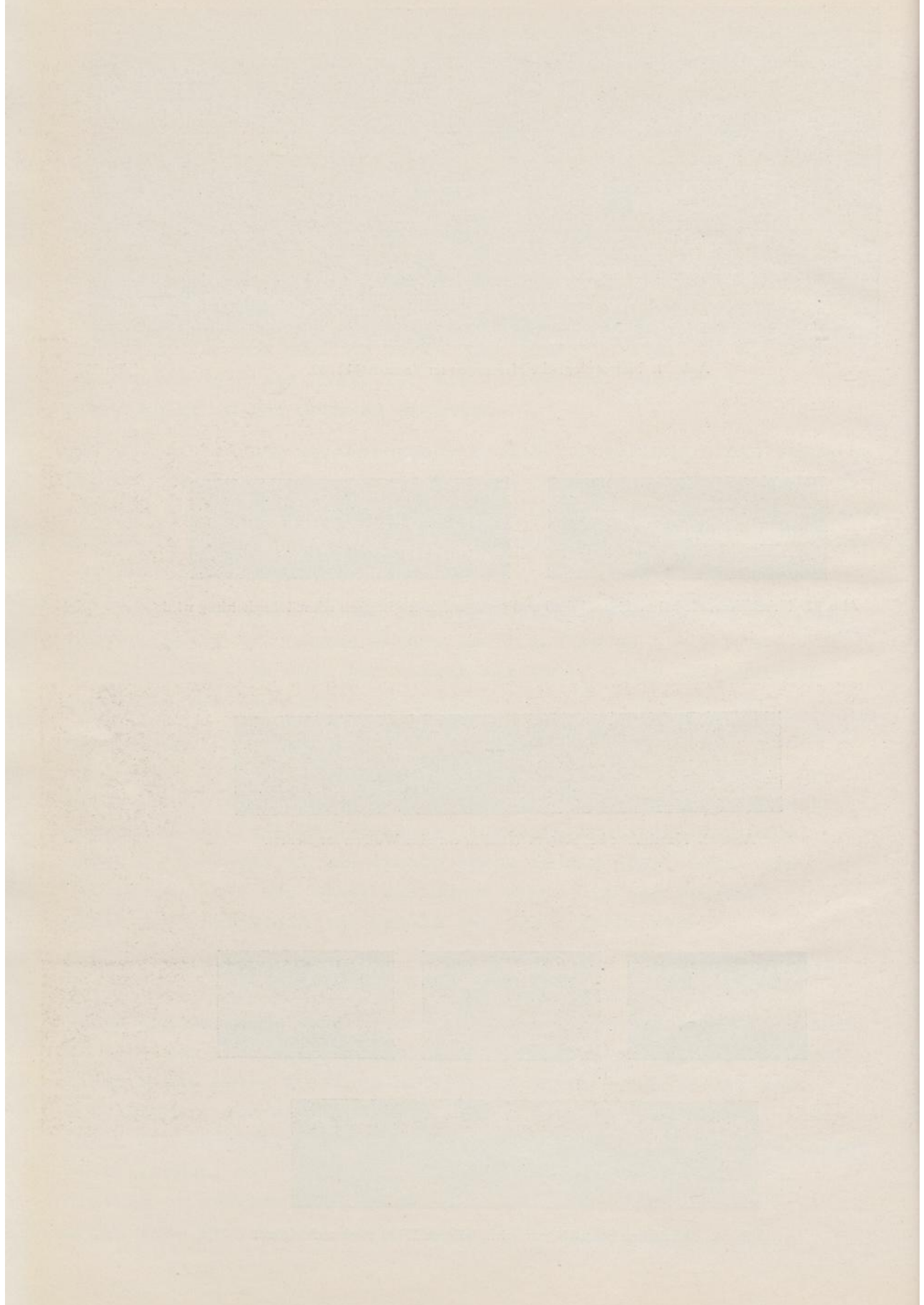
Abb. 32. Nebelfahne, die bei mäßigem Wind und geringer Luftfeuchtigkeit schnell durchsichtig wird.



Abb. 33. Nebelfahne bei böigem Wind in einzelne Wolken zergliedert.



Abb. 34. Nebelfahne bei mäßigem, leicht böigem Wind stark aufsteigend.



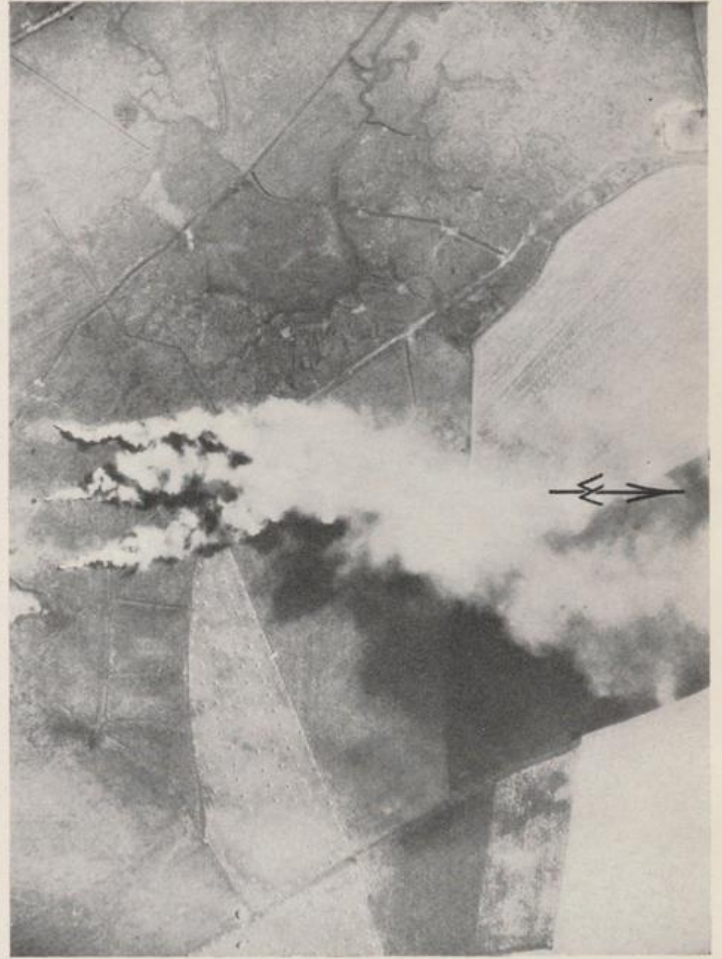


Abb. 35

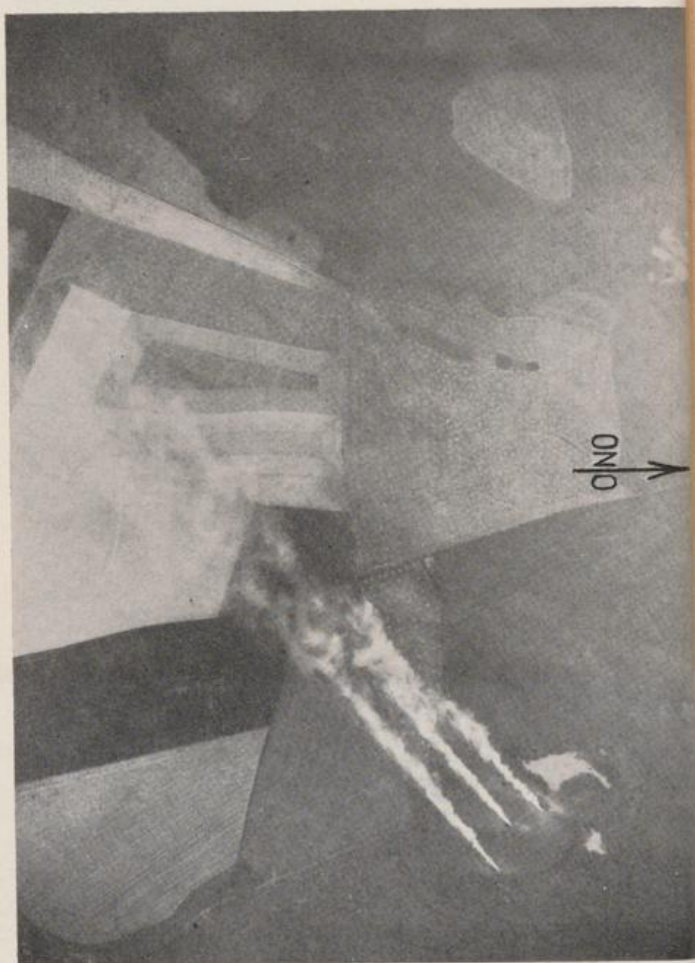
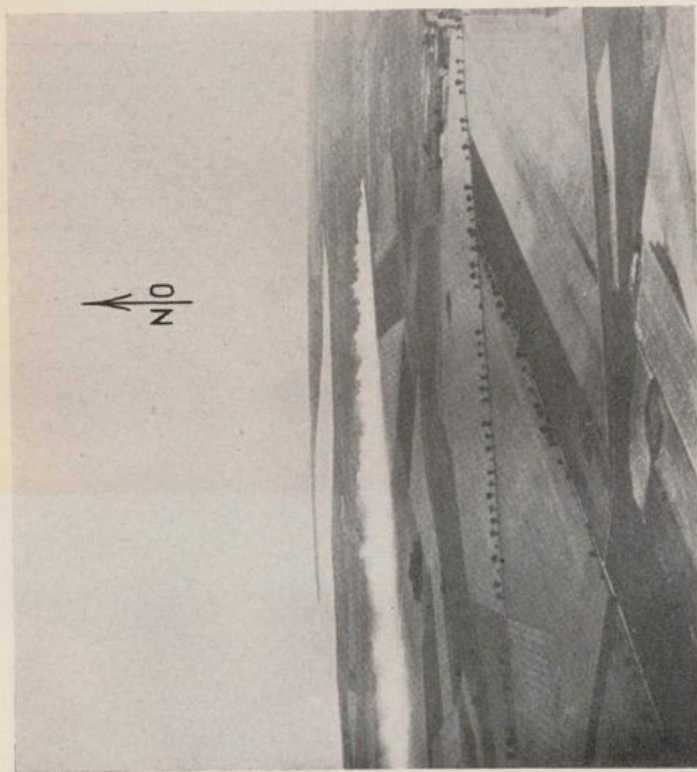
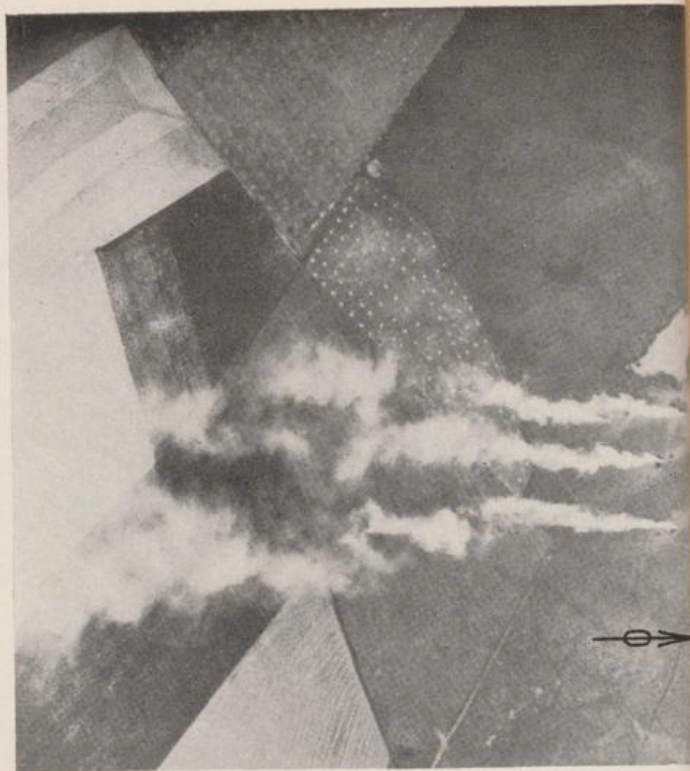
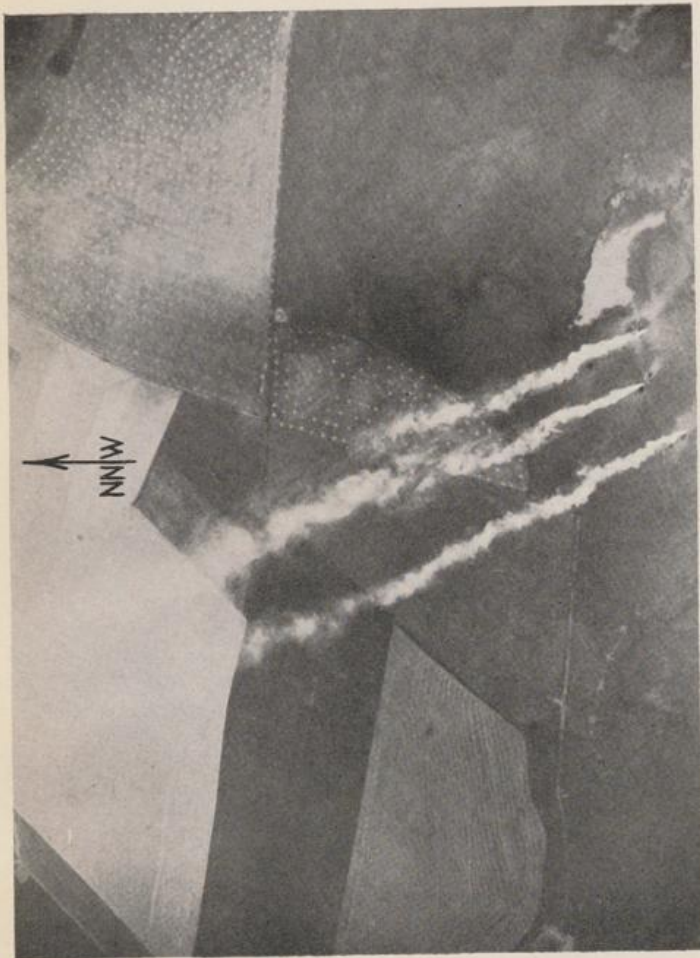


Abb. 36



Abb. 37. Niedrige, geschlossene
Nebelfahne.



Abb. 38. Nebelfahne bei starkem Wind
durchscheinend.

Ausbreitung zu einer geschlossenen Schicht wäre bei den gegebenen meteorologischen Bedingungen und der aufgewandten Nebelsäuremenge eine ausreichende Tarnung nicht erzielt worden.

Bei dem 2. Versuch, bei welchem gleichzeitig Luftaufnahmen gemacht werden konnten, wurde in 16 m Höhe ein recht gleichmäßiger Wind von 6 - 7 m/sek gemessen. Die Feuchtigkeit betrug um 73%, der Himmel war zu mehr als 9/10 mit aufgetürmten Cumuli, Altostratus mit Altocumulus und Cirrostratus bedeckt. Wie die Bodenaufnahme (Abb. 37) zeigt und eine Flugzeugaufnahme aus geringer Höhe beim Anflug besonders gut erkennen lässt (Abb. 36 oben links), waren die Nebelfahnen gleichmäßig geschlossen und lagen flach dem Boden auf. Die Luftaufnahmen lassen wiederum einen seitlichen Zusammenschluß der Nebelfahnen vermissen; selbst in einer Entfernung von mehreren 100 m laufen diese noch getrennt nebeneinander her. Der mässig starke, gleichmäßig wehende Wind verhinderte ihre seitliche Vereinigung. Auch in diesem Falle wäre die Nebeldichte bei einer gleichmäßigen Ausbreitung des Nebels für eine wirksame Abdeckung des Geländes nicht ausreichend gewesen.

Starker Wind setzt naturgemäß die Dichte des Nebels sehr herab. Bei einem Versuch am 27. August schwankte die Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe zwischen 6 und 12 m/sek bei einer mittleren Geschwindigkeit von 7 - 8 m/sek. Die Nebelfahne bildete nur einen ganz dünnen Schleier, durch den man den gesamten Hintergrund erkennen konnte. (Abb. 38). Es war kaum eine Abgrenzung des dünnen Nebelschleiers gegen den grauen Himmel festzustellen. Einzelne Teile der Nebelfahne stiegen ziemlich stark in die Höhe.

4. Anwendung der Versuchsergebnisse für den Nebelinsatz.

A. Die Fragestellung.

Bei der Beurteilung eines Nebelinsatzes ist die Frage zu entscheiden, ob ein Objekt gegen Fliegersicht genügend abgedeckt ist. Damit ist bereits gesagt, daß es nur ein sicheres Mittel gibt, um eine Vernebelung zu beurteilen: die direkte Beobachtung von oben. Da dieses Verfahren im praktischen Einsatz nicht durchführbar ist, muß eine indirekte Methode gesucht werden, die eine Beurteilung der Vernebelung vom Boden aus ermöglicht. Die Schwierigkeit liegt darin, daß es bisher keinen Maßstab gibt, an dem man ihre Wirksamkeit zahlenmäßig erfassen kann. Es bleibt daher dem persönlichen Ermessen des Beurteilenden überlassen, sich auf Grund der meteorologischen Messungen, der Beschaffenheit der Nebeldecke und der Sichtweite ein Urteil über die Schutzwirkung des künstlichen Nebels zu bilden. Gewiss gibt es Fälle, bei denen keine Zweifel an der Wirksamkeit einer Vernebelung bestehen werden, z.B. wenn der Nebel eine geschlossene, dichte Schicht mit scharfer Obergrenze bildet, wie das bei geringer Windgeschwindigkeit und hoher relativer Feuchtigkeit der Fall sein kann. Wenn ausserdem das Objekt nur schwach beleuchtet ist (Dämmerung, Mondschein), so ist die Wirksamkeit des künstlichen Nebels ausser Frage gestellt.

Sind die meteorologischen Bedingungen weniger günstig, so ist es nicht leicht zu entscheiden, ob ein lockerer Nebel, der bei mittlerem Wind und aufsteigender Luftbewegung Höhen von 50 bis 100 m erreicht, das Gelände genügend abzudecken imstande ist.

Es ist damit die Aufgabe gestellt, den persönlichen Faktor bei der Beurteilung eines Nebelinsatzes auszuschalten und die Eigenschaften des künstlichen Nebels bei beliebigen meteorologischen Bedingungen zahlenmäßig zu definieren.

Dabei sind zwei Fragen zu beantworten:

- 1) Wird bei den gegebenen Feuchtigkeits- und Windverhältnissen eine Nebeldecke von ausreichender Dichte erzielt bzw. welche Menge Nebelsäure muß zu diesem Zweck eingesetzt werden ?
- 2) Wie wirkt sich die Erscheinungsform, die der Nebel unter dem Einfluss der Luftströmung annimmt, auf den Erfolg der Vernebelung aus ?

B. Die Grundlagen für die Nebelbereitschaft.

a) Die Sichtzahl.

Als Maßstab für die Dichte eines Nebels dient die Sichtweite, d.h. die Entfernung, bei der ein Gegenstand gerade im Nebel unsichtbar wird. Die Sichtweite ist von der im Nebel enthaltenen Flüssigkeitsmenge und der Tröpfchengröße abhängig. Nach T r a b e r t (1901) besteht zwischen den drei Größen die Beziehung

$$\frac{l \cdot \mu}{2 r} = C ;$$

darin bedeutet l die Sichtweite in Metern, μ den Wassergehalt in g/m^3 , r den Tröpfchenradius in 10^{-3} mm. Die Konstante C wurde von K ö h l e r (1930) zu 3,05 bestimmt.

Die Formel bietet die Möglichkeit, die Sichtweite im künstlichen Nebel unter beliebigen meteorologischen Bedingungen zu berechnen. Die Tröpfchengröße ist nur eine Funktion der relativen Feuchtigkeit. Die Flüssigkeitsmenge im künstlichen Nebel hängt von der Menge der versprühten Nebelsäure, der relativen Feuchtigkeit und der Raumerfüllung des Nebels ab. Diese berechnet sich aus der Windgeschwindigkeit, dem Abstand der Nebelgeräte und der vertikalen Mächtigkeit des Nebels.

Da es bei der praktischen Anwendung nicht auf die Bestimmung der absoluten Sichtweite, sondern nur auf vergleichbare Zahlen ankommt, wurde die Geschwindigkeit der Nebelausbreitung mit der Windgeschwindigkeit gleichgesetzt, was anscheinend nicht der Fall ist (vgl. S. 24). Aus dem gleichen Grunde konnte auch ein stets wechselnder, nur schlecht abschätzbarer und daher die Berechnung sehr erschwerender Faktor ausgeschaltet werden: die vertikale Mächtigkeit des Nebels. Sichtweite und Dichte des Nebels stehen in umgekehrtem Verhältnis zueinander. Um die Dichte des künstlichen Nebels bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen zu vergleichen, ist es daher zweckmäßig, die vertikale Mächtigkeit des Nebels stets auf eine Schichtdicke von 1 m reduziert zu denken. Die für diese Annahme berechnete Sichtweite wird als Sichtzahl bezeichnet. Die wirkliche Sichtweite ist das Produkt aus Sichtzahl und vertikaler Mächtigkeit der Nebeldecke.

Die Sichtzahl schließt ein: die Düsengröße, die relative Feuchtigkeit

keit, die Windgeschwindigkeit und den Abstand der Nebelgeräte. Ihre Werte wurden für die Düsenleistungen von 1/2 l, 3/4 l, 1 l sowie 2 x 1 l pro Minute und einen Abstand der Nebelfässer von 60 m berechnet. Bei einem anderen Abstand der Geräte ist ein Umrechnungsfaktor ($\frac{\text{Abstand der Geräte}}{60}$) anzubringen. Das Ergebnis sind die in den Abbildungen 39 bis 42 dargestellten Kurven, die für die jeweils angegebene Windgeschwindigkeit gelten. Auf der Ordinate ist die relative Feuchtigkeit, auf der Abszisse die Sichtzahl eingetragen.

Ein Beispiel soll die Anwendungsmöglichkeit der Diagramme veranschaulichen. In Tabelle 6 sind die meteorologischen Bedingungen zusammengestellt, bei denen für die verschiedenen Düsenleistungen die Sichtzahl 8 erfüllt ist.

Tabelle 6, Sichtzahl 8 bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen und Düsenleistungen.

Düsenleistung pro Min.	Relat. Feuchtigkeit %	Wind m/sec	Düsenleistung pro Min.	Relat. Feuchtigkeit %	Wind m/sec
1/2 l	78	2	1 l	87	5
	91	3		91	6
	95	4		93,5	7
	97	5		95	8
	98	6		96	9
3/4 l	57	2	2 x 1 l	97	10
	84	3		57	6
	91	4		70	7
	94	5		78	8
	96	6		83,5	9
1 l	97	7	87	10	
	57	3	89	11	
	78	4	91	12	

Mit Hilfe der Sichtzahlen ist es möglich, die Eigenschaften des künstlichen Nebels bei ganz bestimmten meteorologischen Bedingungen zahlenmäßig zu erfassen, zu vergleichen und auch vorauszusagen. Für die praktische Anwendung der Tafeln muß noch die Mindestsichtzahl bestimmt werden, die für eine wirksame Vernebelung erforderlich ist. Sie kann nur durch direkte Beobachtung

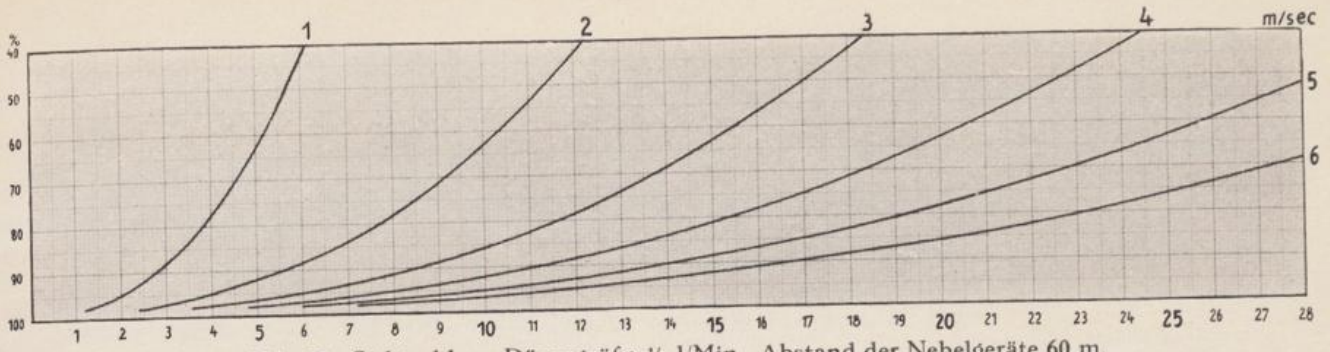


Abb. 39. Sichtzahlen. Düsengröße 1/2 l/Min. Abstand der Nebelgeräte 60 m.

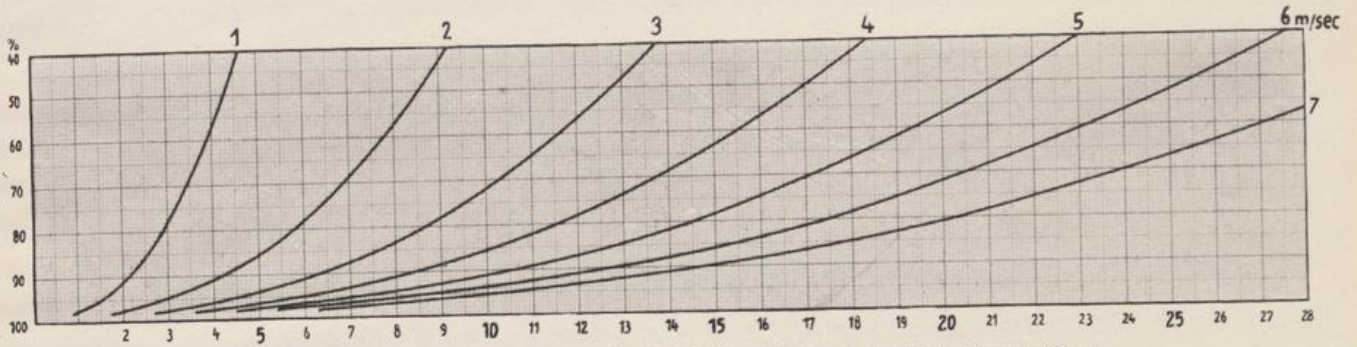


Abb. 40. Sichtzahlen. Düsengröße 3/4 l/Min. Abstand der Nebelgeräte 60 m.

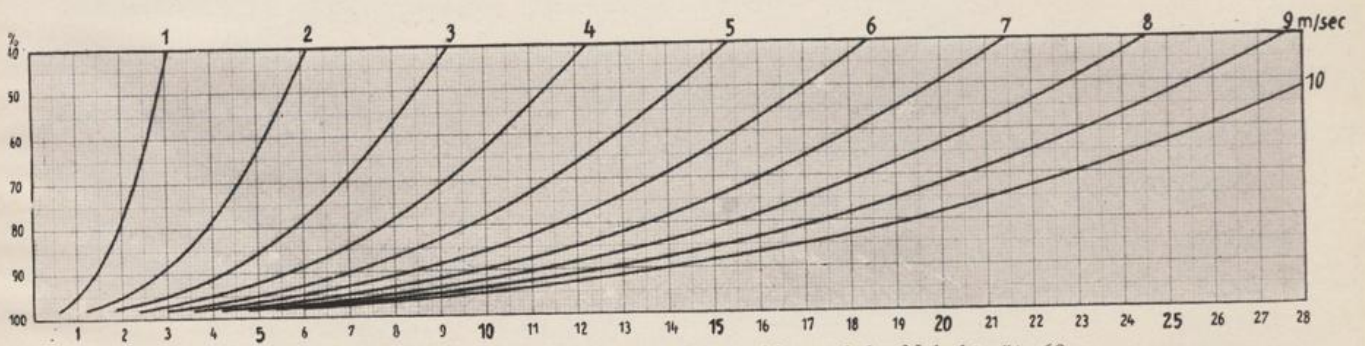


Abb. 41. Sichtzahlen. Düsengröße 1 l/Min. Abstand der Nebelgeräte 60 m.

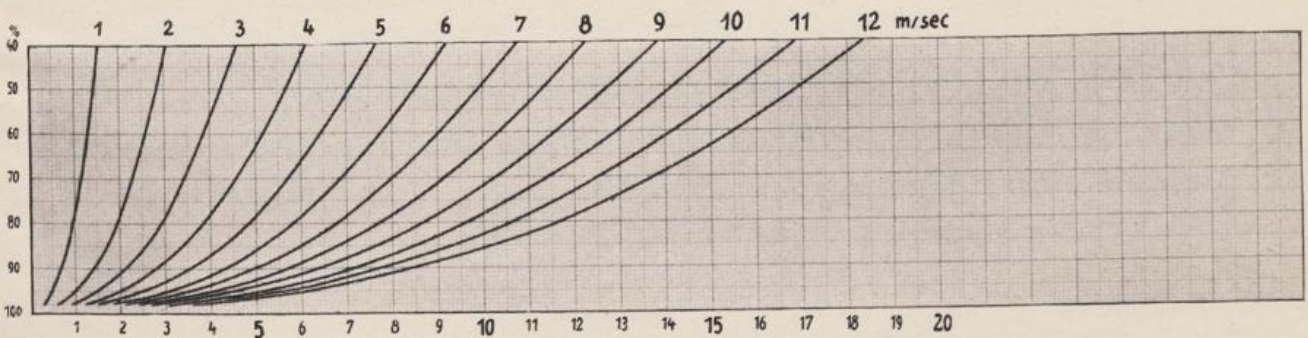
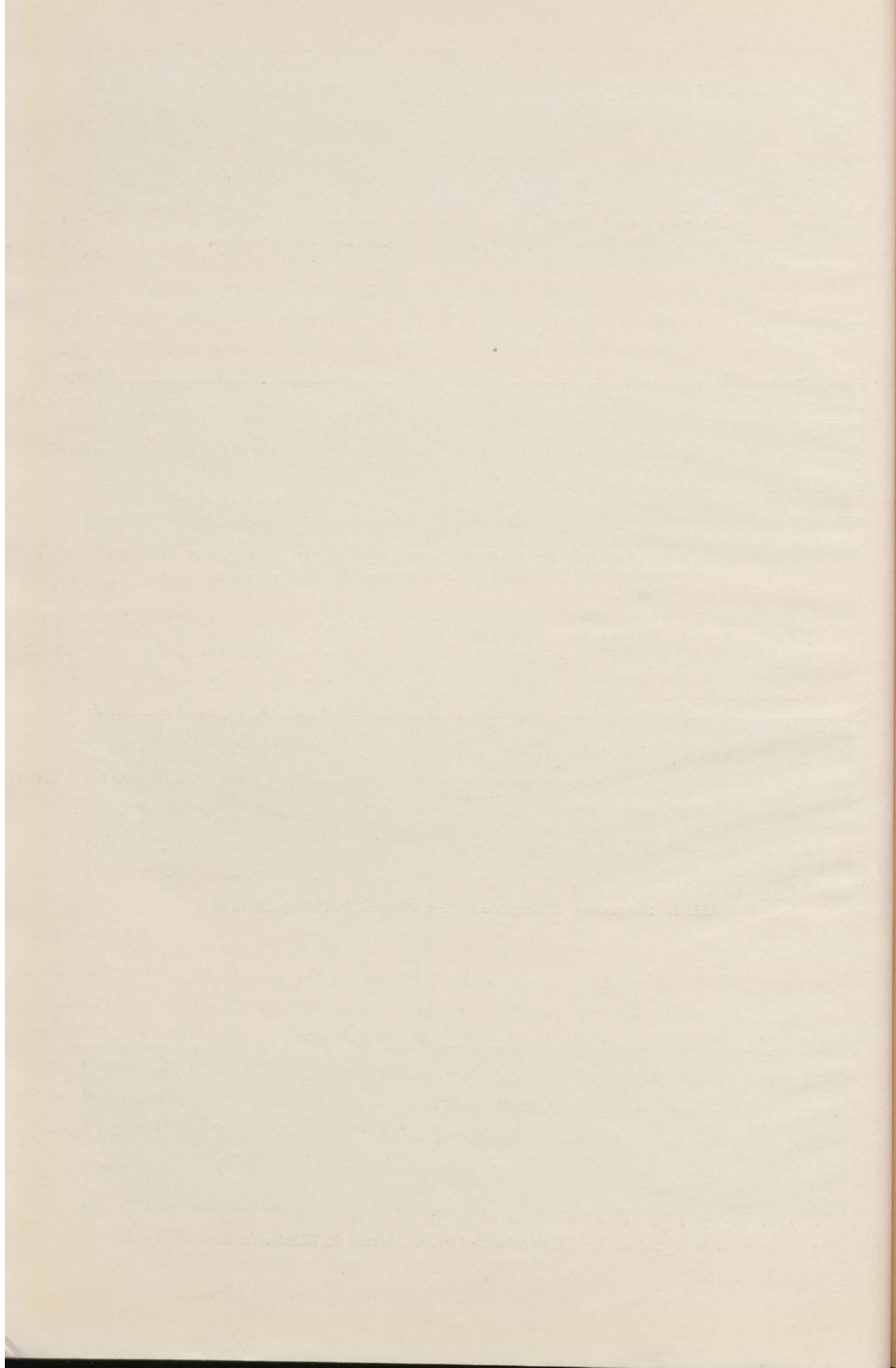


Abb. 42. Sichtzahlen. Düsengröße 2 · 1 l/Min. Abstand der Nebelgeräte 60 m.



von oben ermittelt werden. Ihr Wert wird starken Schwankungen unterliegen in Abhängigkeit von der Reflexzahl (Albedo) und von der Beleuchtung des abzudeckenden Geländes. Liegt das Objekt im hellen Sonnenlicht, so muß die erforderliche Sichtzahl kleiner sein als bei bedecktem Himmel; in der Dämmerung und in der Nacht liegen die Werte höher. Auch für Mondschein und die Lichtwirkung von Leuchtbomben muß die Sichtzahl ermittelt werden.

Bei bekannter Sichtzahl ergibt sich aus den Diagrammen unmittelbar ein Rückschluß auf die Nebelsäuremenge, die eingesetzt werden muß, um eine ausreichende Nebeldichte zu gewährleisten, d.h. auf die Wahl der zu verwendenden Düsenleistung. Es kann damit ein zweckmäßiger Einsatz der Nebelsäure erzielt und ein unnötig hoher Verbrauch vermieden werden.

Die Sichtzahl-Diagramme ermöglichen weiterhin eine Beurteilung der Nebeldichte bei verschiedenen Temperaturen bzw. unter den durch die Trocknung der Luft veränderten Bedingungen. Die in den Diagrammen angegebenen Feuchtigkeitswerte beziehen sich auf die nebelhaltige Luft, die nach den Ausführungen in Abschnitt 2D durch den Nebel eine mehr oder weniger starke Austrocknung erfahren hat. Es müßten daher bei der Anwendung der Sichtzahltafeln die aus Abbildung 6 zu entnehmenden Verminderungen der relativen Feuchtigkeit als Korrekturen berücksichtigt werden. An Stelle der gemessenen Luftfeuchtigkeit wäre mit dem erniedrigten Feuchtigkeitswert in die Sichtzahltafeln einzugehen. Wenn die Korrektur den großen Wert von 1% erreicht - was für Feuchtigkeiten unter 90% nur bei sehr tiefer Temperatur und einem kleinen Nebelvolumen zutrifft - so erfährt in diesem extremen Falle die Sichtzahl nur eine so geringe Veränderung, daß sie nicht berücksichtigt zu werden braucht. Bei Feuchtigkeitswerten über 95% und einem kleinen Nebelvolumen (d.h. also bei geringer Windgeschwindigkeit) kann die Veränderung der Sichtzahl eine Einheit ausmachen. In der Praxis scheidet dieser angenommene Fall ohnehin aus, weil er die Wahl einer kleineren Düse bedingen und sich dadurch der Korrektionswert verringern würde.

Es kann daher abschließend gesagt werden, daß Temperatur bzw. absolute Feuchtigkeit die Ausbildung des Nebels nur unwesentlich beeinträchtigen.

b) Die regelmäßige Beobachtung einer Nebelfahne.

In Abschnitt 3 wurde die Abhängigkeit der Erscheinungsform des künstlichen Nebels von den meteorologischen Verhältnissen eingehend behandelt. Es sollen hier die Folgerungen erörtert werden, die sich aus diesen Beobachtungen für den Nebelinsatz ergeben.

Es ist ohne weiteres einleuchtend, daß die Wirksamkeit einer Vernebelung in hohem Masse von der Gestaltung des Nebels beeinträchtigt wird. Den besten Erfolg gewährleistet eine geschlossene Nebeldecke ohne Lücken und ohne Streifen, die die Windrichtung am Boden verraten könnten. Ungünstig sind also alle meteorologischen Bedingungen, bei denen walzen- oder streifenförmige Nebelfahnen entstehen, die sich nicht seitlich zusammenschließen. Stärkere Böigkeit des Windes verursacht Lücken, die das Schutzobjekt womöglich erkennen lassen. Demgegenüber ist aber zu bedenken, daß das Ausmachen und Erkennen eines Objektes auch in einem nur lückenhaft vernebelten Gebiet zumindest erschwert und dadurch so sehr verzögert werden kann, daß der Nebelinsatz seinen Zweck doch erfüllt.

Wenn auch keine Möglichkeit besteht, die Form des Nebels irgendwie zu beeinflussen (im Gegensatz zur Nebeldichte), so ist es für die Nebelbereitschaft doch notwendig, jederzeit eine Vorstellung von der Erscheinungsform eines plötzlich notwendigen Nebelinsatzes und damit ein Urteil über seine Wirksamkeit zu haben. Dies läßt sich auf einfache und anschauliche Weise durch die regelmäßige Beobachtung einer Nebelfahne erreichen. Es genügt dazu das Anstellen eines einzelnen Gerätes während 2 - 3 Minuten.

Eine solche Beobachtung läßt sich in mehrfacher Hinsicht auswerten. Aus der Gestalt der Nebelfahne und ihrer Ausbreitung nach den Seiten und der Höhe kann geschlossen werden, ob sich eine zusammenhängende Nebeldecke bilden wird oder ob unregelmässige Nebelballen zu erwarten sind. Es ergibt sich ferner ein Anhaltspunkt für die Höhe der Nebeldecke; wenn der Nebel dem Boden aufliegt, muß gegebenenfalls bei der Festlegung der Sichtzahl die nutzlose Höhe des Nebels berücksichtigt werden, d.h. die Höhe der Nebelschicht, die unter dem Objekt liegt als Bruchteil der Mächtigkeit des Nebels.

Von besonderer Bedeutung ist es, die Abzugsgeschwindigkeit der Nebelfahne zu bestimmen, weil sie einen Rückschluß auf die Zeit gestattet, die erforderlich ist, um das Gebiet abzudecken. Es wurde vielfach festgestellt, daß die Geschwindigkeit der Nebelausbreitung von der abweicht, die auf Grund der gemessenen Wind-

stärke berechnet wurde. Man sollte eigentlich annehmen, daß die Versetzung einer Nebelfahne die wahre Windgeschwindigkeit anzeigt. Wenn Abweichungen zwischen gemessener Windstärke und Nebelversetzung bestehen, so dürften diese im wesentlichen darauf zurückzuführen sein, daß die Grundlagen des Vergleichs nicht übereinstimmen. Die Strömungsverhältnisse in einem größeren Gebiet sind nicht einheitlich, z.B. bedingt der Reibungseinfluss über den Häusern einer Stadt erhebliche Veränderungen.

Außerdem muß auch jeweils die Höhe des Windmessers berücksichtigt werden. Sie wird nur selten mit der Höhe übereinstimmen, in der der Nebel abzieht, wodurch wiederum eine Fehlerquelle gegeben ist. Alle diese Schwierigkeiten werden ausgeschaltet, wenn man die Nebelausbreitungsgeschwindigkeit durch direkte Beobachtung ermittelt. Bei einer längeren Beobachtungszeit werden sich Beziehungen zwischen der Nebelabzugsgeschwindigkeit und den Anzeigen eines ganz bestimmten Windmessgerätes ergeben.

Bei windschwachem Wetter kann auf die Kurzvernebelungen überhaupt nicht verzichtet werden. Windrichtung und -stärke können am Boden und in der Höhe bereits so erhebliche Unterschiede aufweisen, daß sie für einen Nebeleinsatz bekannt sein müssen. Als Beispiel kann der Versuch Abb. 10 dienen, bei dem in 2 m Höhe eine Windstärke von $\frac{1}{2}$ m/sec, in 16 m Höhe dagegen 3 m/sec gemessen wurde.

Schließlich lassen einzeln abziehende Nebelfahnen örtliche Besonderheiten im Strömungsfeld eines Vernebelungsgebietes besonders gut erkennen.

Die Zeitdauer, während der eine abziehende Nebelfahne noch wahrnehmbar ist, zeigt die Beständigkeit des Nebels an und erweitert die Grundlagen für die Beurteilung eines Nebeleinsatzes: die Kenntnis über die Dichte des Nebels und seine Erscheinungsform.

Die Untersuchungen haben die enge Verknüpfung der Erscheinungsform des künstlichen Nebels mit den meteorologischen Bedingungen in der bodennahen Luftschicht gezeigt. Wie die meteorologischen Elemente einem ausgeprägten Tagesgang unterliegen, so verändert sich auch die Erscheinungsform des Nebels mit der Tageszeit. Das Ausmaß der Schwankung im Tagesgang der meteorologischen Elemente hängt von der Wetterlage ab. So beeinflusst auch die Wetterlage indirekt die künstliche Vernebelung, die in ihrem Wesen aber eine kleinklimatolo-

gische Angelegenheit ist, bei der die örtlichen Besonderheiten des Vernebelungsgebietes mit den meteorologischen Verhältnissen in der bodennahen Luftschicht zusammenwirken.

5. Zusammenfassung.

Die Aufgabe der vom Marineobservatorium Greifswald durchgeführten Untersuchungen war, Eigenschaften und Erscheinungsform des künstlichen Nebels in ihrer Abhängigkeit von den meteorologischen Verhältnissen zu studieren mit dem Ziel, Unterlagen für den Nebel-einsatz zu gewinnen.

Tropfengrösse und Flüssigkeitsmenge in der Raumeinheit des künstlichen Nebels hängen von der relativen Feuchtigkeit ab. Diese beiden Grössen bestimmen die Dichte eines Nebels. Da Tropfengrösse und Flüssigkeitsmenge bei beliebigen meteorologischen Verhältnissen berechnet werden können, ist es möglich, einen Maßstab für die Dichte des künstlichen Nebels zu gewinnen. An Hand von Sichtzahlentafeln kann die Nebeldichte in ihrer Abhängigkeit von der Düsenleistung, der relativen Feuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und dem Abstand der Nebeldichte zahlenmässig erfasst und verglichen werden.

Für die praktische Anwendung dieses Maßstabes ist eine Ermittlung der Mindestsichtzahlen unter Berücksichtigung der verschiedenartigen Beleuchtung des Schutzobjektes erforderlich.

Von unwesentlichem Einfluss auf die Dichte des Nebels sind die Temperatur bzw. die absolute Feuchtigkeit.

In einer Reihe von Beispielen wird die Abhängigkeit der Erscheinungsform des künstlichen Nebels von den meteorologischen Bedingungen gezeigt. Eine laufende Vorstellung von dem im Tagesgang der meteorologischen Elemente veränderlichen Aussehen des Nebels stellt zusammen mit der Sichtzahl die Grundlagen für die Nebelbereitschaft dar.

6. Angeführte Schriften.

F i n d e i s e n, W : Die kolloidmeteorologischen Vorgänge bei der Niederschlagsbildung. Met. Zschr. 55 (1938)

H o u g h t o n, H.G. and R a d f o r d, W.H. : On the Measurement of Drop Size and Liquid Water Content in Fogs and Clouds. Papers in Phys. Oceanogr. and Met. 6, Nr. 4. Cambridge and Woods Hole, Massachusetts (1938)

K ö h l e r, H.: On Water in the Clouds. Geofys.Publ. 5, No.1 (1930)

N i e l s e n, E. T. und T h a m d r u p, H. M.: Ein Hygrometer für mikroklimatische Untersuchungen. Bioklim. Beibl. 6 (1939)

T r a b e r t, W.: Die Extinktion des Lichtes in einem trüben Medium (Sehweite in Wolken). Met. Zschr. 18 (1901)

