

Untersuchungen über die Herstellung von Eiskristallen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Sedimentation zu pflanzenschützenden Schneedecken

Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen

Zur Verhinderung von Auswinterungsschäden an landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturen sind die Schneeverhältnisse von wesentlicher Bedeutung. Im Gegensatz zu den bekannten Methoden der Frostschadenverhütung bei Spätfrösten gab es bisher keine Möglichkeit, auch bei tiefen winterlichen Temperaturen und fehlenden Schneedecken pflanzenschützende Maßnahmen zu ergreifen. Durch Mitteilungen der Michigan State University wurde dem Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen bekannt, daß in den USA künstliche Schneedecken hergestellt wurden, die für Wintersportzwecke Verwendung fanden. Erstmals war also von Möglichkeiten berichtet worden, mit technischen Hilfsmitteln durch Verwendung von Druckluft und Wasser eine Schneedecke zu entwickeln, die in ihrem Aussehen und wahrscheinlich auch in ihrer Konsistenz einer natürlichen ähnelt.

Für landwirtschaftliche Zwecke scheint die Erzeugung einer künstlichen Schneedecke besonders wichtig zu sein, da es bisher nicht möglich war, die fehlenden pflanzenschützenden Schichten durch technische Apparaturen, d. h. künstlich, herzustellen. Die aus den USA mitgeteilten unterschiedlichen Betriebsdaten und das Fehlen jeglicher einschlägiger Veröffentlichungen lassen erkennen, daß die Entwicklung der dortigen Apparatur nicht über den ersten Versuch hinausgekommen ist.

In der vorliegenden Untersuchung¹⁾ werden deshalb die technischen Möglichkeiten sowie die meteorologischen und physikalischen Bedingungen zur Herstellung von künstlichem Schnee zum Zwecke des Pflanzenschutzes erläutert.

Besondere Berücksichtigung findet die Klärung der Fragen über die Entstehung der eigentlichen Eiskristalle, die auf Grund ihrer Form und Struktur den Niederschlag grundsätzlich beeinflussen. Über die Bildung von natürlichen Eiskristallen in der freien Atmosphäre sind Arbeiten von WEGENER [25], FINDEISEN [5], AUFM KAMPE [11], WEICKMANN [26], KRASTANOW [14; 15] und REGENER [21] bekannt. Im Rahmen dieser Abhandlung muß auf eine ausführliche Darstellung dieser Theorien verzichtet werden; eine kritische Darstellung ist in der Originalarbeit des Verfassers [27] zu finden.

¹⁾ Diese Arbeit wurde im Landmaschinen-Institut der Universität Göttingen durchgeführt. Dem Direktor dieses Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing. GALLWITZ, sage ich für die Stellung der Aufgabe und stets wohlwollende Unterstützung besonderen Dank.

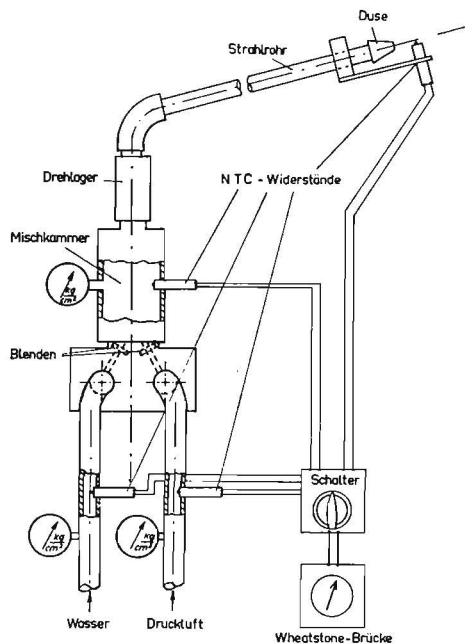


Bild 1: Skizze der Versuchsgерäte

Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsanstellung wurden regnerähnliche Geräte verschiedener Größe, jedoch gleichen Systems verwendet. Es handelte sich um umgearbeitete Schwachregner, bestehend aus Drehlager, Strahlrohr und Düse (Bild 1), an deren Schaft beziehungsweise Drehlager eine Kammer angebracht war, die im folgenden auf Grund ihrer Funktion „Mischkammer“ genannt wird. Im Boden der Mischkammer befanden sich zwei Bohrungen, die den Eintritt zwei verschiedener Medien unter einem Winkel von 35° ermöglichen und mit zwei getrennten Zuführungsleitungen verbunden waren. Durch geeignete Kupplungen war es möglich, Schläuche anzuschließen. Mit Hilfe der Zuführungsleitungen wurden durch die erwähnten Bohrungen Druckluft und Wasser eingeführt. Die Mischkammer sowie der Innenraum des Drehlagers und des Strahlrohres bis zur Düse stellten somit ein geschlossenes System mit einem bestimmten Druck gegenüber den verschiedenen Drücken in den Zuführungsleitungen und dem atmosphärischen Druck vor der Düse dar. In der Mischkammer erfolgte bei gleichzeitiger teilweiser Expansion der Druckluft entsprechend der Versuchsanstellung eine intensive Vermischung der beiden Medien.

Dadurch entstand aus Wasser und Luft ein Zweiphasengemisch, dessen Deutung bei der Erörterung der Versuchsergebnisse folgt.

Durch eine oder zwei Austrittsdüsen (Erhebungswinkel vom Boden etwa 30°) strömte das Gemisch aus der Mischkammer mit dem dort herrschenden Druck. Dabei fand eine zweite Expansion der Druckluft statt.

Tafel 1: Abmessungen der Versuchsgерäte

Bezeichnung der Geräte	A	B
Blende a (Luft) mm \varnothing	4, 5, 5,5, 6, 7	2
Blende b (Wasser) mm \varnothing	4, 5, 6, 7	2,5
Mischkammervolumen in cm ³	163, 244	21
Düse mm \varnothing	8 und 5	3,5

Um weitgehende Variationsmöglichkeiten der Mengen und der Drücke (von Druckluft, Wasser und Gemisch) zu erreichen, waren die Durchmesser der Mischkammer-Zuführungsbohrungen durch Einbau von verschiedenen Blenden leicht zu verändern. Die Abmessungen der Versuchsgерäte sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Die benötigten Mengen an Druckluft wurden für Gerät B von einem stationären Kompressor (Bild 2) mit einer Leistung von 350 l/min bei 7 atü geliefert.

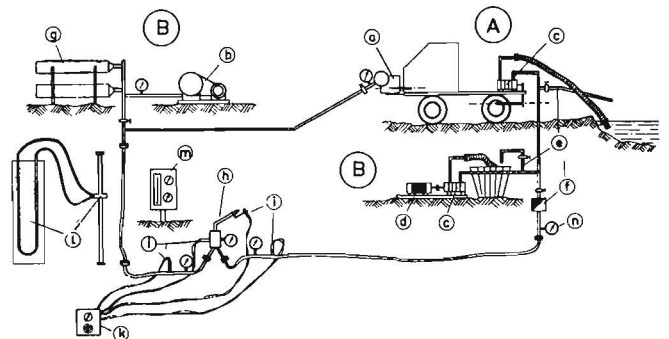


Bild 2: Schema vom Versuchsaufbau

- a Unimog-Anbaukompressor
- b stationärer Kompressor
- c Kreiselpumpe
- d E-Motor
- e Überlauf zur Druckregulierung
- f Wassermesser
- g Druckflaschen
- h Versuchsgерät
- i NTC-Widerstände
- k Schalter + Pontavi-Wheatstone-Brücke
- l VDI-Meßblende + U-Rohr
- m Thermometer, Hygrom., Barometer
- n Manometer

Zum Betrieb des Gerätes A wurde ein Unimog-Anbaupressor der Firma Daimler-Benz mit einer Leistung von 2200 l/min bei 7 atü verwendet, dessen Antrieb von der vorderen Zapfwelle des Unimogs erfolgte. Beiden Geräten diente eine Sihi-Kreiselpumpe (Firma Siemen & Hinsch; Typ A0 3620 K) zur Förderung des notwendigen Wassers, jedoch für Gerät B mit einem Elektromotor (Firma Siemens-Schuckert; 5 kW) als stationäres Aggregat gekoppelt und bei Gerät A auf der Unimog-Ladepritsche, mit Antrieb von der hinteren Zapfwelle, aufgebaut. Somit stand für Gerät A eine bewegliche Anlage zur Verfügung, die es erlaubte, die Versuche teilweise in das benachbarte Mittelgebirge, den Harz, zu verlegen.

In die flexible Wasserleitung (handelsübliche $\frac{3}{4}$ " Gummischläuche) war zur Mengemessung ein Woltman-Wasserzähler (20 cm³ Nennbelastung; $\pm 2\%$ Meßgenauigkeit) eingebaut.

Die Messung der Luftmengen erfolgte durch Einbau einer genormten Blende (25 mm \varnothing) — gemäß den VDI-Durchfluß-Meßregeln [22] — in die Druckluftleitung. Um die leichte Beweglichkeit der Versuchsapparatur zu erhalten, fanden diese Messungen unabhängig von den eigentlichen Schneeversuchen statt.

Die angewendeten Drücke von Luft und Wasser wurden mit geeichten Feinmanometern ermittelt, die in den Zuführungsleitungen der beiden Stoffe und in der Mischkammer eingeschaltet wurden.

Zur Registrierung der in und vor dem Gerät vermutlich besonders bedeutungsvollen Temperaturen erwiesen sich NTC-Widerstände (Firma Valvo) für elektrische Widerstandsmessung als günstig, die nach eingehenden Vorversuchen in Langnippel mit Kunststoff eingegossen und an verschiedenen Meßstellen angebracht wurden. Über einen Schalter und eine Pontavi-Wheatstone-Brücke (Firma Hartmann & Braun) konnten die Meßwerte schnell und fast gleichzeitig ermittelt werden. Nach Eichung der NTC-Widerstände vor den Versuchen waren die gefundenen Werte kurzfristig als absolute Temperaturen abzulesen.

Die einzelnen Meßstellen lagen (Bild 1)

- a) in der Druckluftleitung vor dem Gerät,
- b) in der Wasserzuführungsleitung vor dem Gerät,
- c) in der Mischkammer,
- d) 10 mm vor der Austrittsdüse.

Die Messung der Außenlufttemperatur, des barometrischen Luftdrucks und der rel. Luftfeuchte waren von besonderer Bedeutung. Bei allen Versuchen wurden diese Gegebenheiten mit einem geeichten Maxima-Minima-Quecksilberthermometer (in 10 cm Höhe vom Boden) sowie einem Plattenmanometer und einem Haarhygrometer erfaßt.

Bei der Versuchsdurchführung schien es anfänglich notwendig, besonderes Augenmerk auf die Tröpfchen zu richten, die von den Geräten versprüht werden. Als wichtigstes Merkmal wurde deren Größe betrachtet. Es wurden von den Sedimenten Tropfenbilder hergestellt, die für die Untersuchung ausreichend waren und auf Grund ihrer Tendenzen bedingte Aussagen erlaubten. Die entsprechenden Messungen fanden bei positiven Temperaturen parallel zu den eigentlichen Versuchen statt. In 2,5, 5 und 10 m Entfernung von den Geräten wurden mit einer Vaselineschicht versehene Objektträger waagrecht auf dem Boden ausgelegt, so daß der vom Gerät in 30 s versprühte Niederschlag gut erfaßt werden konnte. Zur Konservierung der Tröpfchen bis zur Auswertung wurde jeweils ein weiterer Objektträger mit wulstigem Rand auf den präparierten geklappt und mittels flüssig gemachter Stearinsäure luftdicht verschlossen (Methode KLÜGEL, [13]). Auf diese Weise war die Auszählung der Tropfen pro cm² und ihre Größenmessung unter dem Mikroskop möglich.

Während der Versuchsarbeiten ergaben sich noch weitere notwendige Meß- und Auswertungsverfahren. Bei der Schilderung der Versuchsergebnisse wird darauf näher eingegangen werden.

Untersuchungen und Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche ergaben, daß es grundsätzlich möglich ist, mit einer speziellen technischen Apparatur die Bedingungen zu schaffen, die die Kristallisation von in der Luft schwebenden Tröpfchen zu Eiskristallen bewirken.

Die entstandenen Eisteilchen ergaben nach dem Herabfallen auf den Boden einen weißen, meßbaren Niederschlag, der in seiner Konsistenz und Wärmeleitfähigkeit natürlichem Schnee gleichartig war. Bei dem zu beobachtenden Schneefall handelte es sich um eine Art „Polarschnee“, d. h. Kristalle einfacher Form, im wesentlichen Nadeln und Platten, die keine Zusammenballungen zu Schneeflocken bildeten und nach WALL [24] in unterkühlten Wasserwolken bei Temperaturen von 0° C bis -10° C entstehen. Aufnahmen von den auf Objektträgern sedimentierten, mit dreifacher Vergrößerung fotografierten Kristallen ließen Durchmesser von 0,25 mm erkennen.

Bei den Versuchsarbeiten zeigte sich, daß die Herstellung von künstlichem Schnee von verschiedenen atmosphärischen, physikalischen und technischen Einflüssen abhängig ist. Als wichtigste wurden folgende festgestellt:

- a) Außenlufttemperatur,
- b) Rel. Feuchte der Außenluft
- c) Temperaturen von Druckluft und Wasser,
- d) Drücke und Mengen von Luft und Wasser,
- e) Tröpfchengrößen.

Wenn auch die einzelnen Faktoren niemals allein für das Gelingen der Versuche, also für die Entwicklung von künstlichen Eisteilchen, ausschlaggebend waren, sollen in der anschließenden Abhandlung die Bedingungen einzeln erläutert werden, soweit es im Rahmen der Gesamtdarstellung möglich ist.

a) Außenlufttemperatur

Als wichtigstes Merkmal der Versuche kann herausgestellt werden, daß nur bei Außenlufttemperaturen von -1° C und tiefer bei weiteren noch zu schildernden Bedingungen freischwebende Eiskristalle nach dem Versprühen des Luft-Wasser-Gemisches entstanden. Höhere Temperaturen verhinderten bei allen Versuchsanstellungen die Kristallisation der Tropfen.

b) Relative Feuchte der Außenluft

Der Wasserdampfgehalt der Luft beeinflusste insofern die Entstehung von Eisteilchen, als bei gleicher Außenlufttemperatur, konstanten Mengen von Druckluft und Wasser und steigenden Werten an rel. Feuchte dann keine Kristallisation mehr eintrat, wenn die Außenluft zu 95% gesättigt war. In diesem Fall mußte mit einer geringeren Wassermenge gearbeitet werden, um bei den genannten Bedingungen ebenfalls Kristalle zu erhalten. Da jedoch ein Wasserdampfgehalt dieser Größe nur selten auftrat — die wesentliche Zahl der Versuche wurde bei einer rel. Feuchte von 62% bis 89% durchgeführt — war der Feuchtigkeitsgehalt der Außenluft so lange vernachlässigbar, bis er den Wert 95% beziehungsweise 100% erreichte. Im ersteren Fall war die Verringerung der Wassermenge pro Luftmenge notwendig und im letzteren trotz verschiedenartiger Versuchsanstellung keine Kristallisation der versprühten Tropfen erreichbar.

c) Temperaturen von Druckluft und Wasser

Es war zu beobachten, daß auch die Temperatur des versprühten Luft-Wasser-Gemisches, d. h. des Sprühschleiers, die Bereitschaft der Tröpfchen zur Kristallisation grundlegend beeinflusste. Die Temperatur des zugeführten Wassers war für die Temperatur des Sprühschleiers von ausschlaggebender Bedeutung.

Es wurde ermittelt, daß nur bei Wassertemperaturen bis zu +10° C nach dem Versprühen Eiskristalle entstanden. Wärmeres Wasser bewirkte in keinem Falle Schneebildung, also auch nicht bei Versuchsdurchführung mit günstig erscheinenden Außentemperaturen von unter -12° C. Wassertemperaturen um den Gefrierpunkt mit Schwankungen von ± 1 ° C ließen aus mechanischen Gründen die Versuche mißlingen, da in diesen Fällen die Zuführungsbohrungen zur Mischkammer zufroren. Möglichkeiten, dies durch Anheizen zu verhindern, wurden nicht untersucht.

Unabhängig von der Menge des zugeführten Wassers war bei Drucklufttemperaturen, die mindestens doppelt so hoch waren wie die des Wassers, ein leichter Temperaturanstieg des Gemisches von höchstens 1° C gegenüber der ursprünglichen Wassertemperatur in der Mischkammer zu messen. An der Düse wurde jedoch diese Temperaturerhöhung durch eine Absenkung um 1° C wieder ausgeglichen. Gleiche Wasser- und Lufttemperaturen bewirkten einen Temperaturabfall von 1° C sowohl in der Mischkammer als

auch an der Düse. Im Sprühschleier herrschten somit nach Temperaturanstieg in der Mischkammer gleiche Temperaturen wie in der Wasserzuführungsleitung oder nach Temperaturabfall, in der Mischkammer und an der Düse höchstens um 2° C tiefer.

d) Drücke und Mengen von Luft und Wasser

Die Versuchsanordnung erlaubte nicht nur die Veränderung des Druckes der zugeführten Luft und des Wassers von 15 bis 70 m WS, sondern auch die Veränderung der Zuführungsblenden an der Mischkammer (Tafel 1). Somit konnten Mengen von 589 l/min bis zu 2130 l/min Luft und Wassermengen von 3,2 l/min bis 43,1 l/min (Gerät A) sowie 84,2 l/min bis zu 290 l/min Luft und 0,5 l/min bis 4,6 l/min Wasser (Geräte B) variiert werden.

Die Vermischung von Druckluft und Wasser in der Mischkammer und der Verzicht auf Rückschlagklappen in den Zuführungsleitungen bewirkten, daß nur bestimmte Drücke der beiden Medien kombiniert werden konnten. Wurden diese Druckverhältnisse nicht eingehalten, entstand in der Wasser- oder Druckluftleitung ein Stau, der den Versuch scheitern ließ. Eine Betrachtung der Druckkombinationen ergab, daß zur Einhaltung gewünschter Mengenverhältnisse von Luft zu Wasser deren Drücke relativ von untergeordneter Bedeutung waren.

Um eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit der vielen Versuchsbedingungen zu erzielen, wurden anhand der Druckkombinationen die Gewichtsverhältnisse der ausgebrachten Luft und des versprühten Wassers berechnet. Infolgedessen konnten die Verhältniszahlen als weiteres Kriterium für die Bedingungen zur Eiskristallbildung benutzt werden. Die Erfassung und Gegenüberstellung der Gewichte erschien insofern günstig, als die spezifischen Gewichte des Wassers und der Luft sich in den interessierenden Temperaturbereichen nur unwesentlich änderten. Für die Berechnung wurde für Wasser $\gamma = 1 \text{ kg dm}^{-3}$ und für Luft $\gamma = 0,0012 \text{ kg dm}^{-3}$ verwendet.

Durch die gefundenen Verhältniszahlen war eine Darstellung der Abhängigkeit der Kristallbildung von den zugeführten Gewichten an Wasser und Luft und der Sprühschleiertemperatur möglich. Wie in Bild 3 bei den in Tafel 2 zusammengestellten Blendenkombinationen ersichtlich, bestehen eindeutige Zusammenhänge

Tafel 2: Blendenkombinationen

Bezeichnung	Gerät A		Gerät B	
	Blende a (Luft) mm \varnothing	Blende b (Wasser) mm \varnothing	Blende a (Luft) mm \varnothing	Blende b (Wasser) mm \varnothing
I	5,5	4	2	2,5
II	5,5	5		
III	5,5	7		
IV	5,5	9		
V	7,0	4		

zwischen den Verhältniszahlen, den Sprühschleier- und den Außentemperaturen. Zur Abgrenzung der Bereiche der Eiskristallbildung, die durch die eingezeichneten Geraden begrenzt werden, dienen die in den Koordinaten eingetragenen Sprühschleiertemperaturen und die Gewichtsverhältnisse. Die ermittelten Kurven in den Abbildungen sind dabei für Außenlufttemperaturen von -1° C bis -2,5° C; -2,6° C bis -5° C; -5,1° C bis -7,5° C und -7,6° C bis -10° C repräsentativ. Tiefere Außenlufttemperaturen traten nur vereinzelt auf, so daß deren Ergebnisse nicht als gesichert angesehen werden können.

Die Grenzen zwischen den Bereichen der Schneekristallbildung und denen, wo Matschschnee entsteht oder Wassertropfen im Niederschlag verbleiben, werden um so weiter nach den Verhältniszahlen 10—25 verschoben, je mehr sich die Sprühschleiertemperaturen dem Gefrierpunkt nähern und die Außentemperaturen im negativen Temperaturfeld absinken. Das Ansteigen der Verhältniszahlen bedeutet die Vergrößerung der Wassergewichte beziehungsweise -mengen. Die Verminderung der Sprühstrahl- und Außenlufttemperaturen erlaubt somit eine Steigerung der Wassermenge pro Luftmenge, die Vergrößerung der Anzahl der Eiskristalle und damit die schnellere Bildung einer Schneedecke von bestimmter Stärke pro Zeiteinheit. Ferner ist zu beobachten, daß bei dem Vorhandensein eines gegebenen Wasser-Luft-Verhältnisses die Bereitschaft zur Eiskristallbildung bei ansteigenden Sprühschleiertemperaturen abnimmt. In den Bereichen der kleinen Verhältniszahlen (1—8) entstehen jedoch auch nur dann Kristalle, wenn die Sprühschleiertemperaturen nicht höher als +10° C sind.

e) Tropfengrößen

Die Größe der von den Versuchsgeräten versprühten Tropfen war weniger von dem absoluten Druck an der Düse als vielmehr von den Voraussetzungen abhängig, die von den absoluten Mengen an Luft und Wasser und ihrem Verhältniswert geschaffen wurden. Es war nicht möglich, auf Grund der ermittelten Tropfengrößen oder deren prozentualer Zusammensetzung Rückschlüsse auf ihren Einfluß bei der Kristallisation zu ziehen.

Analyse der entstandenen Schneedecke

Trotz Vorhandensein von Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt entstand, wie schon geschildert, nicht bei allen Versuchseinstellungen Schnee; zum Teil waren nur Zwischenstadien zwischen dem Eis und Wasser sowie reines Wasser als Niederschlag festzustellen.

Es erschien erforderlich, die Konsistenz der entstandenen Schneedecken zur Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit von künstlichem Schnee einer genauen Analyse zu unterziehen. Der prozentuale Anteil der Luftporenschlüsse im Vergleich zum Anteil des Eises mußte deshalb ermittelt werden (Methode nach KLEINSCHMIDT, [12]), um die Dichte des Schnees bestimmen zu können, die nach NIEMANN [19] Aussagen über die Art des Niederschlages (Neuschnee oder Altschnee) erlaubt.

Die Analyse der mit „Schnee“ anzusprechenden Niederschläge ergab trotz verschiedener Blendenkombinationen und Sprühschleier- und Außentemperaturen keine wesentlichen Unterschiede in ihrer Dichte. Die künstliche Schneedecke hatte nach dem Entstehen auf dem Boden die Struktur eines abgesetzten Neuschnees (im Mittel der Versuche Schneedichte 0,28 g cm⁻³; 71% Luftanteil). Eine Beeinflussung des Luftanteils konnte durch verschiedene Versuchsanordnungen nicht erreicht werden, da die Begrenzung auf Außenluft-Temperaturbereiche von 0° C bis zu -12° C nur die Entstehung von bei diesen Temperaturen spezifischen Kristallformen erlaubte, die somit die Struktur der Schneedecke bestimmten.

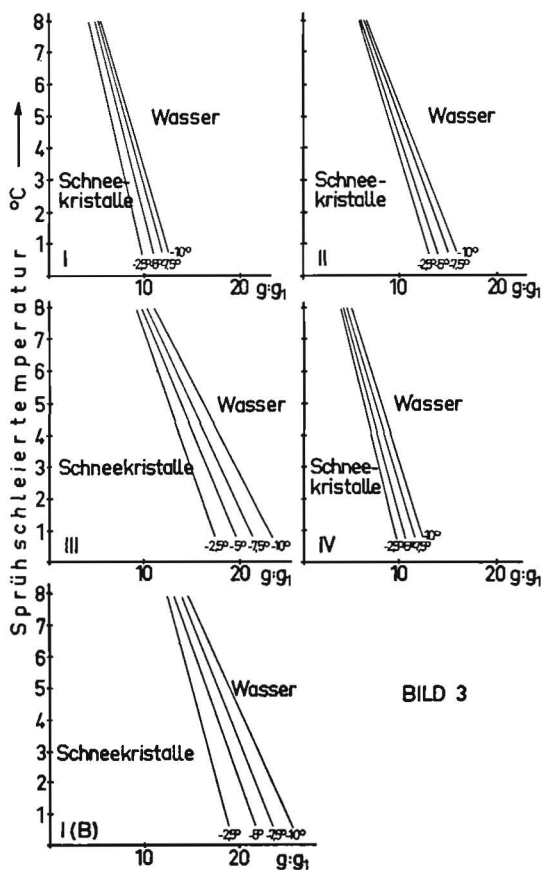


Bild 3: Grenzen der Schnee-Entstehung (bei 60—95% rel. Luftfeuchte) (g : g₁ = Verhältnis g Wasser : 1 g Luft)

Die Menge des erzeugten Schnees, gemessen in Schichthöhe pro Zeiteinheit, war nicht unbefriedigend. Bei den Versuchen mußte allerdings auf die zur Bedeckung einer Kreisfläche notwendige Drehung des Strahlrohres verzichtet werden. An der Düse war für Temperaturmessungen eine stromführende Leitung fest angebracht und deshalb eine Arretierung erforderlich. Die Schneesichtstärken waren abhängig von der Entfernung vom Gerät und zeigten abfallende Tendenz nach dem Ende der Wurfbahn. Der Sprühschleier erreichte Maximalwerte von 15 m Wurfweite bei Gerät A und 8 m bei Gerät B mit einer Breite von etwa 1 m in denselben Entfernungen. Die bedeckte Bodenfläche war jedoch bedeutend größer, da die entstandenen Eiskristalle nicht senkrecht zu Boden fielen, sondern ein nicht unwesentlicher Teil sich nach allen Seiten in der Luft ausbreitete. Bei nicht drehender Düse wurde bei Versuchseinstellungen, die zur einwandfreien Kristallisation der versprühten Tröpfchen führten, bei Gerät A auf einer Fläche von rund 60 m² eine Schneedecke gebildet, deren Höhe nach vierstündiger Versuchsdauer von 15 cm in 2 m Entfernung vom Gerät auf 1 cm in 15 m Entfernung abfiel.

Erörterung der Versuchsergebnisse

Die vorangegangenen Ermittlungen der zur Eiskristallbildung notwendigen Faktoren zwingen zu der Fragestellung, aus welchen Gründen die erwähnten Bedingungen bei der Versuchsanstellung zum Erfolg führen. Im folgenden soll versucht werden, zu deren Klärung beizutragen.

Das in der Mischkammer aus Luft und Wasser gebildete Gemisch stellt — genau definiert — ein Zweiphasengemisch dar, dessen Mediengewichte unterschiedlich sind. Es ist somit beim Versprühen bestimmten Bedingungen unterworfen, die für den Übergang der Tropfen in die feste Phase nicht ohne Bedeutung sind.

Das Einströmen von Wasser und Luft in die Mischkammer erfolgt auf Grund der unterschiedlichen Drücke nicht mit gleichen Geschwindigkeiten. Die intensive Durchmischung der beiden Medien ergibt jedoch eine sofortige Verminderung der Luftgeschwindigkeit, so daß die Annahme berechtigt erscheint, daß Druckluft und Wasser als Gemisch mit gleichen Geschwindigkeiten aus der Mischkammer durch das Strahlrohr und die Düse strömen. Infolge der unterschiedlichen Luft- und Wassergeschwindigkeiten beim Einströmen in die Mischkammer ist die Strömungsart des Gemisches als Spray-flow bestimmt, der nach KLÜGEL [13] bei Luftgeschwindigkeiten von > 50 m/s und bei Wassergeschwindigkeiten von > 2 m/s auftritt; Gas und Wasser passieren mit gleicher Geschwindigkeit die Rohrleitungen und das Strahlrohr. Die Flüssigkeit ist in diesem Fall völlig in Tropfen aufgelöst und verläßt in einem mehr oder minder homogenen Gemisch mit der Luft die Düse.

Beim Entstehen des Spray in der Mischkammer erfolgt eine innige Berührung von Luft und Wasser. Da atmosphärische Luft niemals rein ist, sondern einen großen Anteil an Staubpartikeln, Verunreinigungen und sonstigen Schwebeteilchen aufzuweisen hat, bewirkt die Vermischung der Druckluft mit dem Wasser ein Aufbringen und Anlagern von Staubpartikeln an die entstandenen Tröpfchen, ohne so lange von irgendwelchem Einfluß zu sein, bis die Tropfen aus dem Sprühschleier fallen. Die Bereitschaft zur später erfolgenden Kristallisation wird also schon in der Düse bei allen Tropfen ausgelöst, wenn diese auch erst später durch weitere Einflüsse stattfindet. Andererseits ist zu erwarten, daß von der Düse ab Vorgänge erfolgen, die zur Kristallisation führen.

Da Tropfen aus einem reinen Wasserstrahl beim Verspritzen in kalte Außenluft nicht auskristallisieren, ist zu folgern, daß die Komponente Druckluft eine Wirkung ausübt, die zur Eisteilchenbildung führt. Der Grund dafür ist bei der Expansion der Luft während des Ausströmens aus der Düse zu suchen. Die Luftspannung, d. h. der plötzliche Druckabfall auf Normaldruck nach Verlassen der Düse, scheint von bestimmter Wirkung auf die Tropfen zu sein. Wenn auch Wasser als nahezu unelastischer Stoff nur eine geringe Volumenvergrößerung bei Druckabfall erfährt, so ist doch zu vermuten, daß durch diesen Vorgang eine Veränderung der Struktur des Tropfens eintritt. Die noch bei positiven Temperaturen im Wasser vorhandenen „kristallinen“ H₂O-Aggregate erfahren wahrscheinlich eine Veränderung, werden vergrößert, so daß diese dieselbe Funktion wie die oben erwähnten, auf die

Tropfen aufgebrachtten Staubteilchen zur Auslösung des Kristallisationsprozesses übernehmen können.

Verfolgt man die weiteren Vorgänge im Sprühschleier, so ist auf die Bedeutung der Randzonen hinzuweisen, denn dort findet unter gut sichtbarer Turbulenz die Vermischung mit der kalten Außenluft statt, und die Tröpfchen kristallisieren beim Vorhandensein bestimmter Bedingungen aus. Der Kristallisationsprozeß wird vermutlich von den auf den Tropfen haftenden Staubpartikeln oder den in ihnen vorhandenen H₂O-Kristallfragmenten beeinflusst. Diese Vermutung kann darauf gestützt werden, daß KRATANOW [14, 15] und REGENER [21] die Kristallisation der Wassertropfen in der freien Atmosphäre auf ähnliche Einflüsse zurückführen.

Es wurde schon öfters darauf hingewiesen, daß außer den genannten Bedingungen noch weitere zur Eiskristallbildung notwendige Faktoren vorhanden sein müssen. Die Beobachtung einer ausbleibenden Eisteilchenbildung wurde trotz Vorhandensein von als geeignet erkannten Sprühschleiertemperaturen und der in den Tropfen bestehenden Bereitschaft infolge Staubteilchen beziehungsweise Kristallfragmenten immer dann gemacht, wenn die Gewichte von Wasser gegenüber denen von Luft und damit die Tropfenkonzentration pro Raumeinheit verändert wurden. Es ist in Bild 3 ersichtlich, daß die Kristallisation im wesentlichen von den Verhältniszahlen der beiden Stoffe abhängt, wobei die verbrauchten Mengen an Wasser und Luft als regelnde Faktoren das Maß des Wasserdampfgehaltes in den Randzonen des Sprühschleiers bestimmen. Beim Einströmen der noch nicht wasserdampfgesättigten Druckluft in die Mischkammer wird deren Dampfgehalt infolge der intensiven Verwirbelung und Durchmischung mit Wasser erhöht, so daß spätestens durch die zweite Expansion an der Düse Sättigung der Luft eintritt. Der das Gerät verlassende Sprühstrahl ist demnach ein Gemisch von Tropfen und wasserdampfgesättigter Luft, das sich in der kalten Außenluft abkühlt.

Einerseits führt die Abkühlung des Sprühschleiers zur weiteren Erhöhung des rel. Wasserdampfgehaltes der Luft und andererseits durch die Vermischung mit der kalten ungesättigten Außenluft zu einem raschen Ausgleich von Wasserdampf, so daß die Randzonen des Sprühschleiers von ungesättigter kalter Luft gebildet werden, in die die Tropfen aus dem gesättigten Sprühstrahl übergehen. Sowie die Tropfen aus der Sättigungszone in die der ungesättigten Luft eintreten, beginnen sie zu verdampfen. Das Maß der Verdunstung ist dabei um so größer, je geringer die rel. Feuchte der Außenluft ist.

Da den verdampfenden Tropfen zum Ausgleich ihres Wärmeverlustes keine Verdampfungswärme von der kälteren Außenluft zugeführt werden kann, wird diese Wärmemenge den Tropfen entzogen. Auf Grund des Dampfdruckgefälles zwischen Tropfen und ungesättigter Luft geht ein Wasserdampfstrom von den Tropfenoberflächen weg, der die Tropfen infolge Auftretens von Verdunstungskälte abkühlt. Die Vorgänge in den Randzonen des Sprühschleiers vollziehen sich in turbulenten Mischbewegungen, so daß nach HÜTTE [9] zwischen Wärmeübergangszahl und Verdunstungszahl die Beziehung

$$\sigma = \frac{\alpha}{c_p} \text{ (kg m}^{-2}\text{h}^{-1}\text{)}$$

besteht. Somit ist das Maß der Verdunstung nicht nur von der größeren Oberfläche der Tropfen im Vergleich zur Verdunstung von Wasserflächen, sondern vor allem von der Geschwindigkeit des Gemisches und der dadurch beeinflussten Wärmeübergangszahl abhängig. Die für die Versuchsanstellung typischen turbulenten Mischbewegungen beschleunigen die Verdunstung und dementsprechend die Abkühlung der Tropfen bis zur Kristallisation.

Die Größe des Wärmeaustausches durch Verdunstung wird bei den Versuchsgeräten von dem Wasserdampfgehalt der Außenluft bestimmt. Bei Luftfeuchtigkeiten von bis zu 95% tritt bei den ermittelten Verhältniszahlen ein so großer Wärmeverlust ein, daß die Kristallisation erfolgt. Steigt dagegen der Wasserdampfgehalt der Außenluft, muß die Menge des versprühten Wassers durch Veränderung der Verhältniszahlen verringert werden, da die hohe Luftfeuchte nur einen geringen Wärmeaustausch zuläßt beziehungsweise die für diesen Feuchtigkeitsgehalt der Außenluft

zu großen Wassermengen bei ihrer Verdunstung die Luft kurzzeitig sättigen und damit die Kristallisation verhindern. Der hohe Dampfgehalt der Luft hemmt die Kristallisation der in großer Zahl vorhandenen Tropfen so lange, bis diese aus der Zone der turbulenten Mischbewegungen ausgefallen sind und nicht mehr kristallisieren können. Extrem hohe Luftfeuchte erfordert somit Verringerung der zugeführten Wassermenge.

Beim Übergang von der flüssigen in die feste Phase wird ferner Erstarrungswärme frei, die von der kalten Außenluft in den Fällen kompensiert wird, in denen Kristalle entstehen. Wird dagegen bei gleichbleibender Außenlufttemperatur die Wassermenge erhöht, erwärmt die freiwerdende Erstarrungswärme die die Tröpfchen umgebende Lufthülle (geringe spez. Wärme; $c = 0,241 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ grd}^{-1}$), und die Kristallisation erfolgt so lange nicht oder das entstandene Eisteilchen schmilzt wieder, bis das Tröpfchen die turbulente Mischzone verlassen hat. Die Versuchsergebnisse bestätigen, daß bei Erhöhung der Wassergewichte (Bild 3) stets zum Ausgleich der größer freiwerdenden Erstarrungswärme die Außenlufttemperaturen fallend sein müssen.

Eine Luftsättigung von 100% verhindert, wie bei den Versuchen beobachtet wurde, in allen Fällen die Kristallisation der versprühten Tropfen. Die Verdampfung und Abkühlung kann durch das fehlende Dampfdruckgefälle von Tröpfchen zu gesättigter Außenluft nicht erfolgen, und Eiskristallbildung bleibt aus.

Es war zu beobachten, daß der Rand des Sprühstrahles nicht scharf umrissen werden konnte, sondern es traten durch die Geschwindigkeit der Druckluft an dessen Begrenzung typische Turbulenzerscheinungen auf, die teilweise eine immer wieder erfolgende Berührung der schon gebildeten Eiskristalle mit dem Sprühschleier bewirkten. Dadurch kamen die Eisteilchen wieder in Bereiche der Luftsättigung, die zur Ausbildung ihrer speziellen Form notwendig ist. Nach LUDLAM [16] sind die Bedingungen in der Expansionskammer von FINDEISEN [4] mit denen in Kumuluswolken vergleichbar. Analog dazu können auch die turbulenten Randzonen des Sprühstrahles mit dieser Wolkenart verglichen werden, da laufend eine Vermischung von übersättigter Luft mit kalter Außenluft erfolgt. Der vorhandene Wasserdampf kondensiert an den als Kondensationskernen wirkenden Eisteilchen, vergrößert deren Volumen und ihre Masse, so daß sie zu Boden fallen.

Weitere entstandene Eiskristalle gelangen nicht in die Bereiche der Wasserdampfübersättigung, erhalten keine Anlagerungen von kondensierendem Wasserdampf, bleiben in den fast unsichtbaren Größenbereichen und verharren schwebend in der Luft.

Bei den versuchsmäßig erzeugten Eiskristallen handelt es sich demnach um Nadeln, die sich am Anfang der Wachstumsperiode befinden und in der Übersättigungszone genährt werden, jedoch dann auf der kurzen Strecke bis zum Boden — infolge geringerer rel. Feuchte der Außenluft — nicht zu Vollkristallen auswachsen können. In der Luft freischwebende, kaum erkennbare Eisteilchen sind als diejenigen anzusprechen, die nicht in die Übersättigungszone gewirbelt werden, dadurch keine Vergrößerung erfahren und Kleinformen bleiben.

Die Fallhöhen der Kristalle sind ohne Bedeutung, wie bei den Versuchen beobachtet werden konnte. Je nach Erhebungswinkel des Strahlrohres betrug die Entfernung des unteren Sprühstrahlrandes bis zum Boden 0,20 m (an der Düse) bis 5 m (Ende des Sprühschleiers). Versuchseinstellungen mit Eiskristallbildung ließen sowohl in der geringen Höhe als auch bei der größeren gleiche Kristallformen und -mengen erkennen.

Zusammenfassung

Mit regnerähnlichen Geräten war es möglich, bei winterlichen Temperaturen künstlichen Schnee im Freiland zu erzeugen. Die entstandenen Kristalle wurden als Nadeln klassifiziert, d. h. Kristalle einfacher Form, die keine Zusammenballungen zu Schneeflocken bildeten. Die künstlich erzeugte Schneedecke war einer natürlichen in ihrer Konsistenz (Dichte $0,28 \text{ g je cm}^{-3}$ = abgesetzter Neuschnee) und damit in ihrer Wärmeleitfähigkeit gleichartig.

Als wesentliche Voraussetzungen zur Erzeugung von Eiskristallen mit technischen Apparaturen konnten ermittelt werden:

1. Außenlufttemperaturen unter -1°C mit weniger als 100% rel. Feuchte,

2. Sprühschleiertemperaturen unter $+10^\circ \text{C}$,
3. Den Außenluft- und Sprühschleiertemperaturen entsprechenden Gewichtsverhältnisse von Wasser : Luft

Die Kristallisation der Tropfen wird von den beim Sprühvorgang entstehenden Tropfenrößen kaum beeinflusst.

Die technische Ausführung der Geräte schafft durch Vermischung von Wasser und Luft die Möglichkeit zur Eisteilchenbildung. Der Kristallisationsprozeß wird durch Abkühlung der Tropfen in den turbulenten Randzonen des Sprühschleiers bei ihrer Verdunstung ausgelöst.

Schrifttum

- [1] BECKER, R. und W. DÖRING: Kinetische Behandlung der Keimbildung in übersättigten Dämpfen. *Annalen der Physik*, H. 23, S. 719
- [2] Czepa, R.: Ein Beitrag zur Schneeforschung. *Meteorol. Zeitschrift* 59 (1942), H. 8/9, S. 281
- [3] ECK, B.: Technische Strömungslehre. Berlin 1949
- [4] FINDEISEN, W. und G. SCHULZ: Experimentelle Untersuchungen über die atmosphärische Eisteilchenbildung. *Forschungsberichte des Reichswetterdienstes (Reihe A) Nr. 27*, Berlin 1944
- [5] FINDEISEN, W.: Die kolloidmeteorologischen Vorgänge bei der Niederschlagsbildung. *Meteorol. Zeitschrift* 55 (1938), H. 4, S. 121
- [6] GRÖBER-ERK: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin 1955
- [7] HOLLEMAN-WIBERG: Lehrbuch der anorganischen Chemie. Berlin 1956
- [8] HOUGHTON, H. G.: On the Physics of Clouds and Precipitation. In: *Compendium of Meteorology*, Boston 1951, S. 165
- [9] HÜTTE: Des Ingenieurs Taschenbuch, Theoretische Grundlagen, Bd. I, Berlin 1948
- [10] JUNGE, C.: Nuclei of Atmospheric Condensation. In: *Compendium of Meteorology*, Boston 1951, S. 182
- [11] AUFM KAMPE, H. J.: Das Wetter und seine Ursachen. Darmstadt 1951
- [12] KLEINSCHMIDT, E.: Handbuch der meteorologischen Instrumente und ihre Auswertung. Berlin 1935
- [13] KLÜGEL, C.-D.: Untersuchungen über Transport und Auflösung von Zweiphasengemischen in einem für die Pflanzenschutztechnik interessierenden Bereich. *Diss. Göttingen* 1957
- [14] KRASTANOW, L.: Über die Bildung der unterkühlten Wassertropfen und der Eiskristalle in der freien Atmosphäre. *Meteorol. Zeitschrift* 57 (1940), H. 10, S. 357
- [15] KRASTANOW, L.: Über die Bildung und das Wachstum der Eiskristalle in der Atmosphäre. *Meteorol. Zeitschrift* 60 (1943), H. 1, S. 32
- [16] LUDLAM, F. H.: The Physics of Ice Clouds and Mixed Clouds. In: *Compendium of Meteorology*, Boston 1951, S. 192
- [17] NAKAYA, U.: Snow Crystals, natural and artificial. Cambridge 1954
- [18] NAKAYA, U.: Untersuchungen über natürliche und künstliche Schneekristalle. *Mitteilungen der deutschen Akademie der Luftfahrtforschung* 2 (1943), H. 1
- [19] NIEMANN, A.: Die Bedeutung einer Schneedecke für die bedeckten Pflanzen, für den Boden und die schneenahe Luftschicht. *Die deutschen Gartenbauwirtschaft* 5 (1957), H. 9, S. 168
- [20] NIEMANN, A.: Neue Untersuchungen zur Physik der Frostberegnung. In: *Acten der internationalen Tagung für Frostberegnung*, Bozen 1957
- [21] REGENER, E.: Versuche über die Kondensation und Sublimation des Wasserdampfes bei tiefen Temperaturen. *Schriften der Akademie der Luftfahrtforschung*, Heft 37
- [22] VDI: Durchflußmeßregeln, 6. Ausgabe, 1948
- [23] VOLMER, M. und W. SCHULTZE, W.: Kondensation an Kristallen. *Zeitschrift für phys. Chemie (Reihe A)* 1 (1931), H. 3, S. 156
- [24] WALL, E.: Über die Entstehung der Schneekristalle. *Wiss. Arbeiten des deutschen meteorol. Dienstes im franz. Besatzungsgebiet* 1 (1947), H. 1, S. 140
- [25] WEGENER, A. und K. WEGENER: Vorlesungen über Physik der Atmosphäre. Leipzig 1935
- [26] WEICKMANN, H.: Formen und Bildung atmosphärischer Eiskristalle. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 28 (1945), H. 1, S. 12
- [27] KUNZE, F.: Untersuchungen über die Herstellung von Eiskristallen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Sedimentation zu pflanzenschützenden Schneedecken. *Diss. Göttingen* 1959

Résumé

Fritz Kunze: "Some Investigations on the Production of Ice Crystals with Special Reference to their Sedimentation for the Formation of Snow Blankets for the Protection of Plant Life."

These investigations are concerned with the technical possibilities as well as the appropriate meteorological and physical conditions necessary for the production of artificial snow for protection of plant life.

Hermann Raussendorf 70 Jahre

Am 18. September beging HERMANN RAUSSENDORF seinen 70. Geburtstag — eine schöne Gelegenheit, des findigen Konstrukteurs, des erfolgreichen Unternehmers und eines Menschen von hohen Qualitäten zu gedenken.

Es ist nicht eben häufig in der Geschichte der Landtechniker, daß einer mit 17 Jahren sein erstes Patent anmeldet, das sein weiteres Leben bestimmen sollte: H. RAUSSENDORF erhielt es im Jahre 1906 für eine Strohpresse mit fallenden Schwingkolben, und es ist nicht übertrieben, wenn man sagt, daß diese Erfindung mit der Zeit alle anderen Systeme ablöste. 1911 verließ die erste selbstbindende Raussendorf-Fallschwingkolbenpresse in Leichtbauweise das Singwitzerwerk, 1912 stand sie auf der DLG-Ausstellung in Straßburg, 1928 waren schon 10000 Stück verkauft. 1934 glückte die Kombination von Dreschmaschine und Strohpresse; frühere Versuche waren infolge der Schwerbauweise gescheitert. Auf der Reichsnährstands-Ausstellung 1935 in Hamburg konnten die Besucher die neue Raussendorf-Stahlkombi zum ersten Mal besichtigen; sie erhielt 1936 die höchste Auszeichnung.



Im Anschluß daran entwickelte HERMANN RAUSSENDORF mit Prof. KNOLLE zusammen einen Rübenköpfschlitten, und der Erwerb der Neuen Flöther AG in Gassen gestattete die Ausdehnung des Produktionsprogramms auch auf Kartoffelvielfachgeräte und luftbereifte Ackerwagen.

1945 war von dem mühselig aufgebauten Besitz nichts mehr da: das Hauptwerk in Bautzen wurde von den Russen enteignet, Gassen fiel unter polnische Verwaltung, ein Zweigwerk in Tetschen-Bodenbach wurde tschechisch, und die einzige Filiale im Westen, Köln, war ein Trümmerhaufen. Aber HERMANN RAUSSENDORF fing nochmals von vorne an. In Eschwege baute er wieder stationäre Strohpressen und entwickelte Anbaupressen für Mähdrescher, darunter auch eine für Massey-Harris-Mähdrescher. Im Jahre 1950 übertrug er der Firma Massey-Harris die lizenzierte Herstellung seiner Pressen — so entstand das Massey-Harris-Zweigwerk Raussendorf in Eschwege, dessen Leitung er bis 1955 innehatte. 1956 zog er nach Vienenburg um, wo er sich mit PAEGERT zur Landmaschinenhandlung Paegert & Raussendorf GmbH zusammensetzte.

So blickt der Jubilar an seinem 70. Geburtstag auf ein beschwerliches Leben zurück, dem das Auf und Ab nicht erspart blieb. Er hat jedoch nie den Mut verloren, und er hat sich im Landmaschinenbau und um die Landwirtschaft große Verdienste erworben. Und er hat sich Freunde erworben, die ihm für die weitere Zukunft alles Gute wünschen.

Äußere Anerkennungen sind die Verleihung der Max-Eyth-Gedenkmünze und der Würde eines Dr.-Ing. E. h. durch die Fakultät für Maschinenbau der Technischen Hochschule München.

El tamaño de las gotas producidas por la pulverización apenas influye en su cristalización.

Por la mezcla de agua y de aire, la construcción de los aparatos da la posibilidad para la formación de partículas de hielo. El proceso de cristalización se origina por la refrigeración de las gotas en las zonas de turbulencia de los bordes del velo.

It was found possible to produce artificial snow on open ground at winter temperatures by the aid of artificial rain equipment. The crystals thus produced have been classified as being of the needle type, i.e., crystals of a simple structure with no tendency to coagulate and form snowflakes. The artificial snow blanket so produced has a density of 0.28 gms per cubic centimeter, which is equivalent to that of fresh snow and, therefore, equivalent in its capacity to conduct heat.

Essential pre-requisites for the production of ice crystals by artificial means were found to be the following:

- 1. Ambient air temperatures below -1°C and less than 100% relative humidity.*
- 2. Spray temperatures below $+10^{\circ}\text{C}$*
- 3. The ration between the spray and ambient air temperatures must be the same as the ratio between the weights of water and air.*

The magnitude of the droplets of the spray has hardly any influence on the crystallisation of the droplets.

The mixing of the air and water in the artificial rain equipment creates the possibility of producing ice particles. The crystallisation process is started by the cooling of the drops in the turbulent marginal zones of the spray during evaporation thereof.

Fritz Kunze: «Recherches sur la formation de cristaux de glace en tenant compte en particulier de leur sédimentation en des couches protectrices des plantes.»

L'étude présente traite des possibilités techniques ainsi que des conditions météorologiques et physiques de la formation de neige artificielle en vue de la protection des végétaux.

A l'aide d'appareils analogues aux arroseurs, il a été possible de produire, dans les champs, à des températures hivernales, de la neige artificielle. Les cristaux formés ont été classifiés comme aiguilles, c'est-à-dire comme des cristaux à forme simple qui ne se sont pas associés en agrégats pour former des flocons de neige. La consistance et par conséquent la conductibilité thermique de la couche de neige produite artificiellement ont été équivalentes à celles d'une couche de neige naturelle (densité 0,28 g/cm³ = neige nouvellement tombée et tassée).

On a pu déterminer comme conditions essentielles pour la production de cristaux de glace à l'aide d'appareils techniques, les suivantes:

- 1. Températures extérieures inférieures à -1°C , humidité relative de l'air inférieure à 100%,*
- 2. Température de l'eau atomisée inférieure à 10°C ,*
- 3. Rapport des poids respectifs de l'eau et de l'air correspondant aux températures de l'air extérieur et du brouillard d'atomisation.*

La cristallisation des gouttelettes n'est guère influencée par leur grosseur.

La conception appropriée des appareils permet la formation de particules de glace grâce au mélange d'eau et d'air. Le phénomène de cristallisation est amorcé par le refroidissement des gouttelettes à la suite de leur évaporation dans les zones extérieures turbulentes du brouillard d'atomisation.

Fritz Kunze: «Investigaciones sobre la producción de cristales de hielo, con vista a su sedimentación en capas de nieve protectoras de las plantas.»

En estas investigaciones se trata de la posibilidad técnica, así como de las condiciones meteorológicas y físicas, para la formación de nieve artificial con fines de protección de las plantas.

Con aparatos parecidos a los de lluvia artificial se ha conseguido, a temperaturas de invierno, producir nieve artificial en campo libre. Los cristales que se formaron, se clasificaron como agujas, es decir cristales de forma sencilla que no llegaron a cuajar en copos de nieve. La capa así producida tenía una consistencia igual a la de la nieve recién caída (0,28 gr. cm³), es decir de la misma conductibilidad calorífica.

Han podido apreciarse como condiciones para la producción de cristales de hielo con aparatos técnicos las siguientes:

- 1. Temperaturas a la intemperie de menos de -1°C , con menos del 100% de humedad relativa;*
- 2. Temperaturas del velo de pulverización inferior a $+10^{\circ}\text{C}$;*
- 3. Relaciones de peso agua | aire que correspondían a las temperaturas a la intemperie y a la del velo de pulverización.*