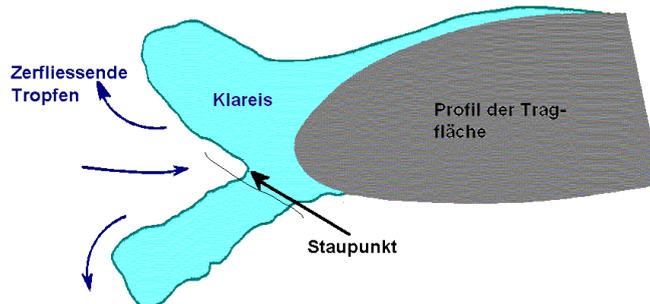


Wolkenschnüffler



Flugmeteorologie



Eigenschaften des Klareisansatzes

Größe der vereisungsverursachenden Tröpfchen	groß ($d \geq 20 \mu\text{m}$)
Auftreten hauptsächlich im Temperaturbereich	0 °C bis -10 °C (Ausnahme Cb)
Oberfläche	glatt, glasig
Ansicht (Draufsicht)	dunkel, nass
Lufteinschlüsse	keine oder winzig kleine
Haftfähigkeit	sehr gut
Festigkeit	zäh
Dichte	800 bis 1000 kg m ⁻³
Ansatz und Wachstum	von den Vorderkanten die Tragfläche überziehend

Vereisung

Michael F. H. Krutina

Stand: Dezember 2006

D:\Webseite\Deckblätter\ Vereisung Webseite.wpg

Inhaltsverzeichnis

	Seitenzahl
1. Art und Intensität der Vereisung	1
1.1 Arten des Eisansatzes	1
1.1.1 Reif (Hoar frost)	2
1.1.2 Raueis (Rime ice)	2
1.1.3 Klareis (Clear ice)	3
1.1.4 Gefrierender Regen und Sprühregen (Rain ice)	5
1.1.5 Backschnee (Pack snow)	5
1.2 Intensitätsstufen der Vereisung	5
1.2.1 Subjektive Bestimmungsmethode	6
1.2.2 Objektive Bestimmungsmethode	7
2. Vereisungsprägende Faktoren	8
2.1 Wolkenphysikalische Parameter	8
2.1.1 Unterkühlter Flüssigwassergehalt von Wolken	9
2.1.2 Größe der Tröpfchen	17
2.1.3 Horizontale Ausdehnung von Wolken	18
2.2 Aerodynamische Faktoren des Luftfahrzeuges	19
2.2.1 Auffang-Wirkungsgrad der Flugzeugoberfläche	19
2.2.2 Aerodynamische Erwärmung	21
3. Auswirkungen der Vereisung	23
4. Schutz vor Vereisung	27
5. Vereisungsmerkmale von Wolken	30
5.1 Zusammenfassung der bestimmenden Faktoren	30
5.2 Vereisung in Schicht- und Quellwolken	32
5.2.1 Schichtwolken	33
5.2.2 Quellwolken	33
5.3 Vereisung an Fronten	34
5.3.1 Warmfronten	34
5.3.2 Kaltfronten	36
5.3.3 Okklusionen	38
5.3.4 Unterkühlter Regen oder Sprühregen	38
6. Vereisungsvorhersage	39
6.1 Allgemeine Hinweise	39
6.2 Vorhersageverfahren	42
6.2.1 TEMP-Auswertung	42
6.2.2 Vereisungszonen in der Bodenwetterkarte	46
6.2.3 TEMP und Bodenwetterkarte	46
Literaturverzeichnis	48

1. Art und Intensität der Vereisung

Als Vereisung wird die Ablagerung von Eis, Reif oder Schnee auf Luftfahrzeugen bezeichnet, die sich in der Luft befinden oder am Erdboden abgestellt sind.

Vereisung tritt dann ein, wenn sich unterkühlte Wolkentröpfchen auf Flugzeugoberflächen mit Temperaturen von unter 0 °C ablagern, dadurch ihr instabiles Gleichgewicht verlieren und erstarren.

Die hauptsächliche Ursache für Vereisung während des Fluges ist unterkühltes Wasser (s. 2.1.1).

Luftfahrzeuge vereisen aber auch durch das Anfrieren von fallenden Niederschlägen und der Sublimation von Wasserdampf auf dem Flugzeugrumpf.

Auch am Erdboden können Eisansätze durch die Ablagerung von fallenden und abgesetzten Niederschlägen auftreten.

1.1 Arten des Eisansatzes

Die WMO unterscheidet folgende Haupttypen des Eisansatzes:

- Reif (Hoar frost),
- Raueis (Rime ice)
- Klareis (Clear ice),
- Vereisung durch gefrierenden Regen und Sprühregen (Rain ice) und
- Backschnee (Pack snow).

Die Art des Eisansatzes, der sich an Luftfahrzeugen ausbilden kann, lässt sich häufig nicht eindeutig klassifizieren, weil sich aufgrund der wechselnden meteorologischen Bedingungen während des Fluges durch eine Vereisungszone oft Mischformen zwischen Rau- und Klareis entwickeln bzw. an verschiedenen Flugzeugsegmenten unterschiedliche Eistypen beobachtet werden.

1.1.1 Reif (Hoar frost)

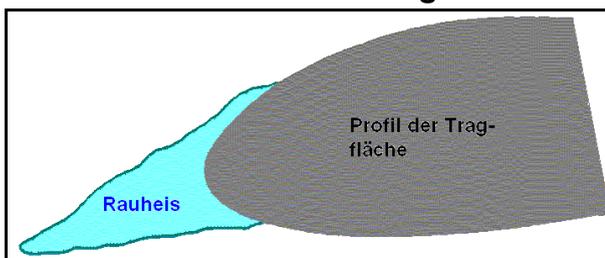
Reif entsteht als weißer, kristalliner, federartiger Eisbelag durch Sublimation des Wasserdampfes auf der Außenhaut von Luftfahrzeugen, wenn deren Temperatur unter dem Reifpunkt (Frostpoint) der Luft liegt.

An parkenden Luftfahrzeugen ist - überwiegend in der kalten Jahreszeit - die Ausbildung von Strahlungs- bzw. Advektionsreif und die Nebelfrostablagerung Rauhref möglich. Während des Fluges kann sich Reif in klarer Luft entwickeln, wenn ein unterkühltes Luftfahrzeug nach längerem Reiseflug in großer Höhe in den Sinkflug übergeht und dadurch rasch in eine wärmere, feuchtere Luftschicht gelangt.

1.1.2 Raueis (Rime ice)

Raueis, ein undurchsichtiger, milchig weißer, spröder und poröser Eisansatz entsteht dadurch, dass stark unterkühlte, relativ kleine Wassertropfchen und Eiskristalle beim Auftreffen auf die kalte Flugzeugoberfläche schlagartig - ohne dabei ihre ursprüngliche Gestalt zu verlieren - mit zahlreichen Lufteinschlüssen anfrieren.

Raueisansatz an einer Tragflächenvorderkante (Abb. 1)



Quelle : [14]

Vertikalschnitt eines Tragflächenprofils mit Raueisansatz

Eigenschaften des Raueisansatzes (Tab. 1)

Größe der vereisungsverursachenden Tröpfchen	klein ($d < 20 \mu\text{m}$)
Auftreten hauptsächlich im Temperaturbereich	unter $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $-40 \text{ }^\circ\text{C}$
Oberfläche	rau, bizarr
Ansicht (Draufsicht)	weiß
Lufteinschlüsse	zahlreich, poröser Eisansatz
Haftfähigkeit	gering, auf Stelzen stehend
Festigkeit	spröde
Dichte	500 bis 800 kg m^{-3}
Ansatz und Wachstum	von den Vorderkanten luvwärts

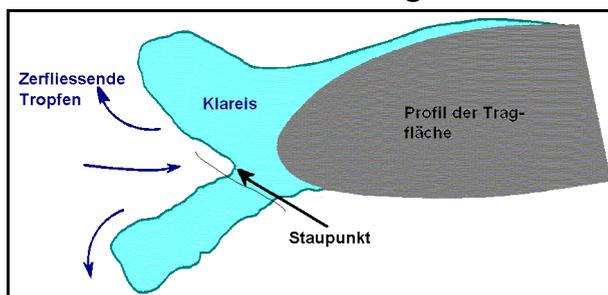
Während des Fluges durch Wolken entsteht Raueis an den Vorderkanten (Leading edges) der angeströmten Flugzeugoberfläche, also an Tragflächen, Streben, Antennen, usw..., wächst dem Fahrtwind entgegen und bildet dabei zum Teil bizarre Formen.

Auch an parkenden Luftfahrzeugen kann sich Raueis als Nebelfrostablagerung ausbilden.

1.1.3 Klareis (Clear ice)

Klareis entsteht beim Durchfliegen von weniger stark unterkühlten Wasserwolken, die relativ große Tröpfchen beinhalten. Die auf das Luftfahrzeug aufprallenden Wolkentröpfchen breiten sich durch den Fahrtwind vor ihrer Erstarrung auf der Flugzeugoberfläche teilweise als Wasserfilm aus - die freigesetzte latente Wärmeenergie verzögert den Kristallisationsprozess - und frieren erst danach zusammen mit den Schneekristallen an. Dadurch bildet sich ein fester, verhältnismäßig glatter und glasiger, durchsichtiger oder trüber Eispanzer aus.

Klareisansatz an einer Tragflächenvorderkante (Abb. 2)



Quelle : [14]

Vertikalschnitt eines Tragflächenprofils mit Klareisansatz

Staupunkt

Ort vor einem umströmten Profil, in dem sich die Stromlinien nach den Seiten aufteilen

Eigenschaften des Klareisansatzes (Tab. 2)

Größe der vereisungsverursachenden Tröpfchen	groß ($d \geq 20 \mu\text{m}$)
Auftreten hauptsächlich im Temperaturbereich	0 °C bis -10 °C (Ausnahme Cb)
Oberfläche	glatt, glasig
Ansicht (Draufsicht)	dunkel, nass
Lufteinschlüsse	keine oder winzig kleine
Haftfähigkeit	sehr gut
Festigkeit	zäh
Dichte	800 bis 1000 kg m ⁻³
Ansatz und Wachstum	von den Vorderkanten die Tragfläche überziehend

Klareis ist eine der gefährlichsten Arten der Vereisung, da bei großer Anströmgeschwindigkeit die Eisoberfläche sehr uneben werden kann, so dass das Flugzeugprofil entscheidend verändert wird. Außerdem sind durch das Ausbreiten des Wasserfilms vor dem Gefrieren auch Bereiche betroffen, an denen normalerweise die Enteisungsanlage nicht mehr wirksam wird.

Auch an parkenden Luftfahrzeugen kann sich Klareis als Nebelfrostablagerung, durch gefrierenden Regen oder Sprühregen und durch das Absetzen von nicht unterkühlten flüssigen Niederschlägen auf den Tragflächen - Fuel-Icing genannt - bilden. Dieser Eisansatz ist die Folge des nach längeren Flüge noch in den Flügeltanks vorhandenen sehr kalten Treibstoffes (Fuel) - bereits nach drei Stunden Flugzeit in großer Höhe kann die Kerosin-Temperatur $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen -, so dass auch die Temperatur der Beplankung sogar bei Lufttemperaturen von einigen Grad über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ unter dem Gefrierpunkt liegt. Dadurch entsteht eine glatte, kristallklare Eisschicht auf der Flächen-ober- und -unterseite (s. Abb. 3), wobei schon Eisdicken von bis zu 2 cm gemessen wurden.

Flight-Report eines Lufthansa-Flugkapitäns (Abb. 3)

 FLIGHT-REPORT COCKPIT		to: NC 01	no
		Empfang	
CPT		737	
FO			
FE			
This Area will be completed by FRA NC 01			
Action		Information	
Quelle: [12]			
Reply to FRA NC <input type="checkbox"/> No Reply		Copy to Yes <input checked="" type="checkbox"/> No	
Subject:			
<p>Wegen Fuel Savings wurde Rückflugbetankung durchgeführt. Flugzeit 1.20 Std. in FI 370. Während des Fluges Abkühlung der Fuel Temperatur auf -10°C.</p> <p>Nach der Landung:</p> <ul style="list-style-type: none">• Remaining Fuel 7.6 t (nearly full wings)• Fuel Tank Temperatur -3°C• OAT -10°C, Nieselregen <p>Ca. 30 Minuten nach der Landung wird der Outside-Check gemacht. Die Minustemperatur der Wing Tanks und der Reifansatz an der Tragflächenunterseite lassen mich auch die Tragflächenoberseite genauer begutachten. Weder von der vorderen noch der hinteren Treppe läßt sich auf der regennassen Fläche außer Wasserlachen irgendwelcher Belag feststellen. Ebenso wenig durch eine Sichtinspektion durch die den Tragflächen nächstgelegenen Kabinenfenster. Erst nach Herausnehmen eines Overwing Exit-Fensters und bei Betreten der Tragfläche (wobei ich sogleich beinahe von derselben gerutscht wäre) läßt sich durch Befühlen unter den Regenlachen solides Klareis erkennen!</p> <p>Das Flugzeug wurde enteist.</p>			

Die Klareisschicht dieses Fuel-Icing ist meist nur schwer zu erkennen, insbesondere bei schlechten Lichtverhältnissen und wenn der Flügel nass ist.

1.1.4 Gefrierender Regen/Sprühregen (Rain ice)

Diese Art der Vereisung entspricht dem Klareis, entsteht aber hauptsächlich durch das Auftreffen von unterkühlten Regen- oder Sprühregentropfen auf die kalte Flugzeugoberfläche mit Temperaturen unter 0 °C. Dadurch ist eine schlagartige Vereisung großer Teile der Flugzeugoberfläche möglich.

Besonders Sprühregen vermag die aerodynamische Leistung aufgrund des an der Flugzeugoberfläche entstehenden extrem rauen Eisbelages stark herabzusetzen.

Unterkühlter Regen kann bei Flügen in Boden- und Frontnähe vor Warm- und hinter Kaltfronten, im Bereich von Okklusionen und an parkenden Luftfahrzeugen auftreten und unterkühlter Sprühregen ist unter dicken Stratusfeldern und unmittelbar vor Warmfronten anzutreffen.

Klareis und gefrierender Regen/Sprühregen sind die gefährlichsten Formen der Vereisung.

1.1.5 Backschnee (Pack snow)

Trockener Schnee haftet im allgemeinen nicht an Flugzeugoberflächen. Vereisung kann jedoch auch bei Flügen durch Schneefallgebiete einsetzen, wenn nasser Schnee bzw. unterkühltes Wasser vorhanden ist, das den Eisteilchen als Bindemittel dient.

Dadurch bildet sich eine sehr raue Oberfläche, so dass die aerodynamische Stabilität des Luftfahrzeuges empfindlich gestört wird.

1.2 Intensitätsstufen der Vereisung

Die Art und Intensität des Eisansatzes während eines Fluges durch eine Vereisungszone hängt von wolkenphysikalischen und aerodynamischen Faktoren ab, die unter 2. näher erläutert werden. Vier bzw. drei (ICAO) Intensitätsgrade werden unterschieden (s. Tab. 3).

Die Intensität der Vereisung lässt sich subjektiv und objektiv bestimmen. Einerseits beurteilt der Flugzeugführer den Eisansatz an seinem Luftfahrzeug während des Fluges. Andererseits wird der Vereisungsgrad durch spezielle Messflüge ermittelt, bei denen die Dicke des Eisansatzes auf einem Normkörper in Verbindung mit der Länge des Flugweges und/oder durch die Werte wolkenphysikalischer Größen abgeleitet wird.

Intensitätsstufen der Vereisung und ihre Symbole (Tab. 3)

Intensitätsstufen	Symbol	Intensitätsstufe	Symbol
Trace (Spuren)	nein	Moderate (mäßig)	
Light (leicht)		Severe (schwer)	

1.2.1 Subjektive Methode

Bei der subjektiven Methode beurteilt der Flugzeugführer den Vereisungsgrad seines Luftfahrzeuges (s. Tab. 4 und 5).

Vereisungsintensität nach ICAO (Tab. 4)

Intensität	Reaktion des Flugzeugführers auf den Eisansatz
Light	weder Kurs noch Höhe müssen geändert werden
Moderate	eine Änderung des Kurses und/oder der Höhe können/kann erforderlich sein
Severe	eine augenblickliche Änderung des Kurses und/oder der Höhe sind/ist notwendig

Quelle : [7]

Vereisungsintensität nach USA Air Weather Service 1980** (Tab. 5)

	Reaktion des Flugzeugführers auf den Eisansatz
Trace	Spuren eines Eisansatzes sind wahrnehmbar, jedoch ist die Wachstumsrate nur geringfügig größer als die Abnahme durch Sublimation. Ein Flug durch solch eine Vereisungszone ist selbst dann ungefährlich, wenn die De- und/oder Anti-Icing-Anlage nicht benutzt wird. Sie ist nur dann gelegentlich einzuschalten, wenn die Aufenthaltsdauer in dem Vereisungsgebiet mehr als eine Stunde beträgt.
Light	Hierbei handelt es sich nur um eine gefährliche Wettererscheinung, wenn sich das Luftfahrzeug mehr als eine Stunde in der Vereisungszone aufhält. Die De- und/oder Anti-Icing-Anlage muss dann zeitweise benutzt werden, um den Eisansatz zu beseitigen bzw. seine Bildung zu verhindern, jedoch ist ein Wechsel des Flugweges nicht erforderlich.
Moderate	Der Eisansatz ist beträchtlich. Auch ein kurzer Aufenthalt in der Vereisungszone ist gefährlich. Die Inbetriebnahme der De- und/oder Anti-Icing-Anlage oder eine Änderung des Flugweges sind notwendig.
Severe	Der Eisansatz wächst so schnell, dass er auch durch den Betrieb der De- und/oder Anti-Icing-Anlage weder reduziert noch kontrolliert werden kann. Eine augenblickliche Änderung des Flugweges ist deshalb unbedingt erforderlich.

**  USA Subcommittee for the Aviation Meteorological Services in the Office of Federal Coordinator for Meteorology [1968], USA Air Weather Service [1980], Amt für Wehrgeophysik [1976]

*  De-Icing : ein vorhandener Eisbelag wird entfernt

 Anti-Icing : eine Eisbildung wird verhindert

Quelle : [7]

1.2.2 Objektive Methode

Hier wird die Dicke eines Eisansatzes von 0.5 inch, der sich an einem in der Luftströmung befindlichen zylinderförmigen Normkörper gebildet hat, mit der Länge des Flugweges in der Vereisungszone und/oder dem Flüssigwassergehalt der Bewölkung in Verbindung gebracht. Damit berücksichtigen die nachstehenden drei Verfahren zur Quantifizierung des Eisansatzes mehr oder minder flugzeugspezifische und meteorologische Parameter, die weiter hinten näher erläutert werden.

Vereisungsintensität (USA National Coordinating Committee for Aviation 1964) (Tab. 6)

Intensität	Flugweg [nm.] und Eisansatz von 0.5 inch (Durchmesser des Normkörpers 0.5 inch)
Trace	80
Light	40
Moderate	20
Severe	10

Quelle : [7]

0.5 inch \approx 1.27 cm

Vereisungsintensität (British Civil Airworthiness Requirements BCAR) (Tab. 7)

Intensität	Flugweg [nm.] und Eisansatz von 0.5 inch – Durchmesser des Normkörpers 0.5 inch – Temperaturbereich 0 bis -10 °C	Flüssigwassergehalt [g m ⁻³]
Light	40	0.2
Moderate	20	0.4
Severe	10	0.8

Quelle : [7]

Vereisungsintensität (USA Weather Service 1980) (Tab. 8)

Intensität	Flugweg [nm.] und Eisansatz von 0.5 inch – Durchmesser des Normkörpers 3 inch – Fluggeschwindigkeit : 320 km/h – Mittlerer Tröpfchendurchmesser • cumuliforme Wolken 17 μ m (Annahme) • stratiforme Wolken 14 μ m (Annahme)	Flüssigwassergehalt [g m ⁻³]	
		cumuliforme Wolken	stratiforme Wolken
Trace	80	\leq 0.07	\leq 0.11
Light	40	0.08 - 0.49	0.12 - 0.68
Moderate	20	0.50 - 1.00	0.69 - 1.33
Severe	10	> 1.00	> 1.33

Quelle : [7]

2. Vereisungsprägende Faktoren

Die Art und Intensität der Vereisung während des Fluges sind einerseits von wolkenphysikalischen Größen und andererseits von aerodynamischen Faktoren des Luftfahrzeuges abhängig. Dazu gehören hauptsächlich

- der Gehalt der Wolke an unterkühltem Flüssigwasser,
- das Tröpfchenspektrum,
- die horizontale Ausdehnung von Wolken,
- dem Auffang-Wirkungsgrad der Flugzeugteile an unterkühltem Wasser und
- die Stärke der aerodynamischen Aufheizung, die mit der Fluggeschwindigkeit steigt.

2.1 Wolkenphysikalische Parameter

Die wolkenphysikalischen Parameter, welche die Vereisung dominieren, sind

- der Gehalt der Wolke an unterkühltem Flüssigwasser,
- das Tröpfchenspektrum und
- die horizontale Ausdehnung der Wolke.

2.1.1 Unterkühlter Flüssigwassergehalt

2.1.1.1 Der atmosphärische Gefrierprozess

Wasser tritt in der Troposphäre in allen drei Aggregatzuständen auf, in gasförmiger, flüssiger und fester Form. Die flüssige Phase ist dabei nicht nur über 0 °C zu beobachten, sondern bis weit unter dem Gefrierpunkt können Wassertröpfchen in einem labilen Gleichgewichtszustand existieren.

Unterkühlte Tröpfchen, die besonders häufig im Temperaturbereich von unter 0 bis etwa -12/-20 °C anzutreffen sind, aber auch schon vereinzelt bei -40 bis -45 °C nachgewiesen wurden, entstehen bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt durch

- Kondensation des Wasserdampfes,
- den Aufwindtransport nicht unterkühlter Wassertröpfchen in höhere Wolkenbereiche,
- die Ausstrahlungsabkühlung an der Wolkenobergrenze und
- flüssigen Niederschlag, der in eine bodennahe Kaltluftschicht fällt.

Wasser gefriert nur dann im Temperaturbereich von 0 bis -40 °C , wenn Kerne existieren, die den Gefrierprozess einleiten, oder wenn das unterkühlte Wasser in Berührung mit einer Eisoberfläche kommt.

In Abhängigkeit von der Temperatur werden Gefrierkerne - je nach Größe und Beschaffenheit - unterschiedlich aktiv.

Je eisähnlicher der molekulare Aufbau eines Gefrierkerns und je größer der Kern ist, desto früher setzt der Kristallisationsprozess ein.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Wolkentröpfchen gute Gefrierkerne enthalten, sie einfangen oder mit Eisteilchen zusammenstoßen, nimmt mit ihrem Umfang zu.

Für große Tröpfchen beginnt deshalb der Gefriervorgang bereits bei Temperaturen zwischen 0 und -4 °C und ist bei -15 °C beendet.

Für kleine Tröpfchen - dem Hauptanteil der Wolkentropfen - fängt der Kristallisationsvorgang dagegen bei etwa -10 °C an, erreicht zwischen -12 und -15 °C ein Maximum und ist bei -20 °C und darunter überwiegend abgeschlossen.

Natürlich ist die Effektivität des Gefriervorganges in Mischwolken auch von der Menge der Eisteilchen abhängig. Je höher ihre Anzahl, desto größer ist die Häufigkeit ihrer Zusammenstöße mit unterkühlten Tröpfchen.

Der Gehalt an unterkühltem Flüssigwasser ist der die Flugzeugvereisung in Wolken weitgehend bestimmende meteorologische Faktor und wird hauptsächlich dominiert von den nachstehenden Größen:

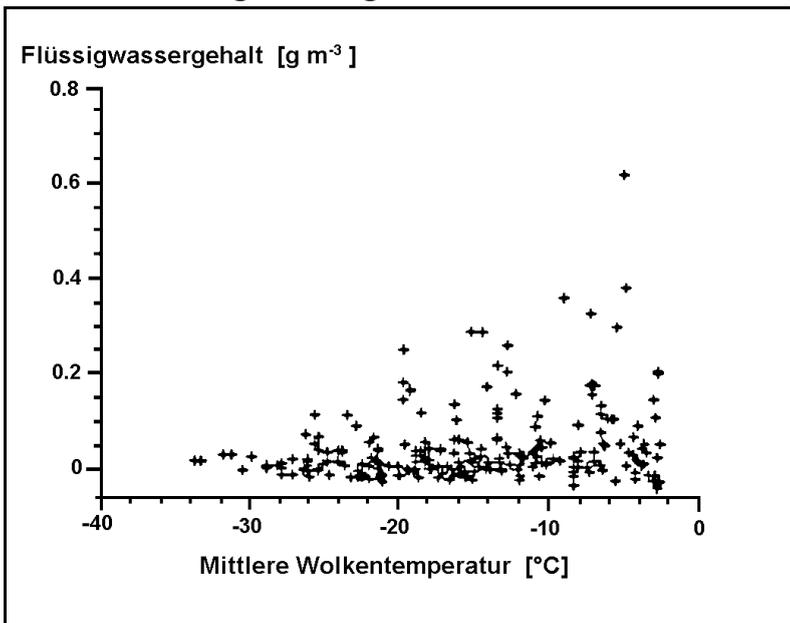
- Temperatur,
- Aufwindgeschwindigkeit der Luft,
- Eiskristallgehalt von Mischwolken,
- Entrainment und
- Niederschlag.

2.1.1.2 Temperatur

Der Gehalt an unterkühltem Wolkenwasser ist - wie in 2.1.1.1 erläutert wurde - entscheidend von der Temperatur abhängig.

Unterkühltes Wasser tritt in Wolken zwar zwischen 0 und -40 °C auf, jedoch der Hauptanteil befindet sich im Temperaturbereich von 0 bis -15 °C (s. Abb. 4).

Mittlerer Flüssigwassergehalt als Funktion der Temperatur (Abb. 4)



Quelle : [2]

Mittlerer Flüssigwassergehalt von unterkühlten tiefen und mittelhohen Wolken

Die negativen Werte des Flüssigwassergehaltes beruhen auf Messfehlern des Satelliten bei dünnen Wolken.

Vereisungsrelevant sind damit nur Wolkengattungen, die unterkühlte Wolken- oder Niederschlagströpfchen enthalten (s. Tab. 9). Dazu gehören unterkühlte Wasserwolken (Cu, Ac, Sc, St) und Mischwolken (Cb, Ns, As).

Wolkengattung, -elemente und Häufigkeit des Auftretens (Tab. 9)

Gattung	Wolken		Unterkühltes Wasser	
	Häufigkeit des Auftretens [%]	Wolkenströpfchen	Niederschlagstropfen	
Ci, Cs, Cc	22	nein	nein	
As, Ac	45	ja	As	
Ns	10	ja	ja	
St, Sc	66	ja	ja	
Cu	9	ja	ja	
Cb	2	ja	ja	

Quelle : [2]

Aber auch der temperaturabhängige maximale Wasserdampfgehalt der Luft darf nicht vernachlässigt werden. Allgemein gilt, je höher die Temperatur an der Wolkenbasis ist, desto größer erweist sich auch die Menge an flüssigen Wassertröpfchen.

Da subtropische Luftmassen meist höhere Temperaturen zeigen als Polarluft, ist auch der Flüssigwassergehalt in Wolken subtropischer Luftmassen im allgemeinen höher als in Wolken polarer Luftmassen.

2.1.1.3 Aufwindgeschwindigkeit

Der Flüssigwassergehalt in Wolken ist immer dann hoch, wenn sein Verlust - z.B. durch Sublimation in Mischwolken und durch Entrainment - ausgeglichen oder überkompensiert wird. Die Aufwindgeschwindigkeit der Luft bestimmt mit der Temperatur - der maximale Wasserdampfgehalt ist temperaturabhängig - den Nachschub an Wasserdampf oder Flüssigwasser.

In einer Mischwolke herrscht immer dann Sättigung gegenüber der flüssigen Phase bzw. die relative Luftfeuchte beträgt 100 %, wenn der zur Verfügung stehende Wasserdampfgehalt der Wolke größer ist als die auf den Eiskristallen sublimierende Wasserdampfmenge. Ist dies der Fall, so nimmt der Flüssigwassergehalt nicht durch Verdunstung von Wolkentropfen und dem Hineinfallen von Eiskristallen aus höheren Schichten ab und kann groß sein.

In der Bewölkung aktiver Fronten besteht deshalb die Möglichkeit, dass ein wesentlicher Anteil an unterkühltem Wasser auch bei Temperaturen von unter -15 °C existiert, trotzdem Eisteilchen aus höheren Schichten in diesen Bereich hineinfliegen.

In konvektiven Wolken können sogar hohe Flüssigwasserwerte bei noch tieferen Temperaturen angetroffen werden.

Andererseits nimmt der Prozess der Umwandlung von unterkühlten Wolkentropfen in Eiskristalle bei nachlassender Aktivität enorm zu, da bei markanter Abnahme der Aufwindgeschwindigkeit der Wasserdampfnachschub nicht mehr groß genug ist.

Jede Variation der Aufwindgeschwindigkeit führt deshalb zu einer Änderung des Flüssigwassergehaltes der Wolke. Auf der Luvseite eines Höhenrückens z.B. werden vorhandene Hebungsprozesse verstärkt, so dass der Flüssigwassergehalt dort höher ist.

2.1.1.4 Entrainment

Unter dem Begriff 'Entrainment' versteht man das Einbeziehen von Umgebungsluft durch turbulente Durchmischung an den seitlichen Rändern eines aufsteigenden Luftpaketes. Dieser Effekt tritt auf, wenn sich das Luftquantum relativ zu seiner Umgebung bewegt und ist besonders kräftig in konvektiver Bewölkung ausgeprägt.

Das Entrainment schwächt die Auftriebskraft der Wolkenluft, reduziert den Flüssigwassergehalt, führt zu einer vertikalen und horizontalen Durchmischung und modifiziert das Partikelspektrum in einer noch nicht vollständig verstandenen Weise.

Ist die Umgebungsluft verhältnismäßig trocken und die Aufstiegs geschwindigkeit des Luftpaketes groß, wird ein bedeutender Anteil von Wolkentröpfchen in die einbezogene, ungesättigte Luft hinein verdunstet, bis wieder Wasserdampfsättigung herrscht. Der Flüssigwasseranteil der Wolke kann dadurch erheblich abnehmen.

Leider lässt sich die Größenordnung des Entrainments eines aufsteigenden Luftpaketes nicht genau abschätzen, da selbst der Ablauf dieses Prozesses noch nicht hinreichend geklärt ist.

2.1.1.5 Eiskristallgehalt von Mischwolken

In Mischwolken mit einem Temperaturspektrum von -10 bis -30 °C laufen Prozesse ab, die zu einer Verringerung des Flüssigwassergehaltes führen können.

Weil in diesen Wolken alle drei Aggregatzustände des Wassers gleichzeitig vorhanden sind und die relative Luftfeuchte fast 100 % beträgt, wachsen die Eiskristalle aufgrund des geringeren Sättigungswertes in bezug auf Eis durch Sublimation (Bergeron-Findeisen-Prozess).

Ist die Anzahl der Eisteilchen relativ gering, so gewinnen sie rasant an Größe, können von schwächeren Aufwinden nicht mehr getragen werden und fangen auf ihrem Fallweg durch die Wolke unterkühlte Tröpfchen ein, die an ihnen festfrieren.

Zusätzlich bewirkt ein schnelles Wachstum ein Zerschneiden von Eiskristallen, so dass die Wolke mit Eisteilchen angereichert wird.

Der dadurch stark abnehmende Wasserdampfgehalt durch Sublimation führt zu einer Untersättigung gegenüber der flüssigen Phase, so dass Wolkentröpfchen in der Umgebung der wachsenden Eisteilchen verdunsten müssen. Auf diese Art und Weise können Eiswolken entstehen.

Beide Vorgänge, die Sublimation und das Einfangen von unterkühlten Tröpfchen, bewirken eine Verminderung des Flüssigwassergehaltes in Mischwolken, die beträchtliche Ausmaße annehmen kann.

Bei der Bildung von Mischwolken setzen diese Prozesse aber erst ein, wenn die Temperatur an der Wolkenobergrenze den Wert -15 °C unterschreitet, weil die Anzahl der aktiven Gefrierkerne bei höheren Werten zu gering ist.

Bereits vorhandene Bewölkung dagegen kann jedoch durch vertikale Ausdehnung in Höhenregionen hineinwachsen, so dass diese Vorgänge stattfinden.

Dadurch besteht die Möglichkeit, dass der Flüssigwassergehalt völlig vernichtet wird, sofern nicht Vorgänge existieren (s. 2.1.1.3), die für einen ausreichenden Wasserdampfnachschub sorgen und damit die Neubildung von Wolkentröpfchen ermöglichen.

Vereisung tritt jedoch nicht nur in Wolkenbereichen auf, in denen nur wenig Eiskristalle, aber viel unterkühltes Wasser vorhanden ist. Flüge durch Mischwolken ergaben, dass sich auch Eiskristalle an der Flugzeugzelle anlagern, wenn unterkühlte Tröpfchen als Haftmittel dienen (Backschnee-Vereisung).

Eiskristalle bleiben kleben, wenn die unterkühlten Wassertröpfchen genügend zahlreich und groß genug sind, um die Flugzeugoberfläche zu benetzen, und das Anfrieren der Eiskristalle nach dem Auftreffen so langsam erfolgt, dass eine feste Bindung entsteht.

Manchmal ist der unterkühlte Flüssigwassergehalt gering, die Tropfengröße klein und die Temperatur tief. In diesem Fall gefrieren die Tröpfchen sofort beim Aufprall auf die Flugzeugzelle, so dass die Eiskristalle nicht haftfähig sind.

Das zum Beginn dieses Vereisungsvorganges notwendige Mengenverhältnis zwischen unterkühltem Wolkenwasser und Eiskristallen ist nicht bekannt, hängt aber offensichtlich von der Temperatur und der Tropfengröße ab.

Backschnee-Vereisung ist besonders für schnell fliegende Luftfahrzeuge relevant.

2.1.1.6 Fallender Niederschlag

Die niederschlagsbildenden Prozesse Koaleszenz, Sublimation in Mischwolken und Vergraupelung bewirken grundsätzlich ein bevorzugtes Wachstum einiger weniger Wolkenelemente auf Kosten der umgebenden Hydrometeore.

Dadurch besteht die Möglichkeit, dass sich der Flüssigwassergehalt einer Wolke verringert, sofern nicht andere Vorgänge existieren, die für einen Nachschub an Flüssigwasser sorgen (s. 2.1.1.3). Andererseits kann die Anzahl der Wolkenelemente in den unteren Wolkenbereichen durchaus zunehmen, wenn zu groß gewordene und vom Aufwärtsstrom der Luft nicht mehr getragene Teilchen aus höheren in tiefere Regionen gelangen.

Es ist ebenfalls durchaus vorstellbar, dass zwischen diesen beiden Prozessen ein ausgeglichenes Gleichgewicht herrscht.

Da auch dieser Effekt sich nur schwer bestimmen lässt, gestaltet sich die Berechnung des gesamten Flüssigwassergehaltes und im besonderen die des unterkühlten Wassers außerordentlich schwierig.

2.1.1.7 Messergebnisse des Flüssigwassergehaltes

Ein hoher Flüssigwassergehalt (LWC ☞ Liquid water content) ist in Wolken mit stärkeren Aufwindgeschwindigkeiten, also in Quellwolken anzutreffen, und ein niedriger LWC dominiert in Schichtwolken (S. Tab. 10). Weiterhin wurde festgestellt, dass hohe LWC-Werte in Zonen starker Aufwinde - wie z.B. im Zentrum von Cu con - auftraten, und dass in den Gipfelbereichen von Wolken sowie in deren Randzonen ein geringerer LWC zu finden ist, was auf die Einmischung trockener Umgebungsluft durch Entrainment hinweist.

Flüssigwassergehalt (LWC) in Wolken (Tab. 10)

Hydrometeor	Flüssigwassergehalt [g m ⁻³]		
	maximale Werte		Mittelwerte
	selten	häufig	
Schichtwolken	bis 1	0.6	0.1 - 0.4
Quellwolken	bis 10	5	0.1 - 1
Nebel	–	–	meist < 0.1

Quelle : [15]

LWC ☞ Liquid water content

Um die Beziehung zwischen dem Flüssigwassergehalt von Wolken und der Dicke und Art des Eisansatzes zu ermitteln, wurden bei Messflügen durch Wolken der Eisansatz untersucht, der sich in Strömungsrichtung an einem Metallzylinder mit einem Durchmesser von 12.5 mm auf einem Flugweg von 10 NM und einer Fluggeschwindigkeit von etwa 125 kn gebildet hatte.

Die Temperatur betrug 0 bis -16 °C und der mittlere Tröpfchendurchmesser der Wolken-elemente lag bei 13 bis 340 µm.

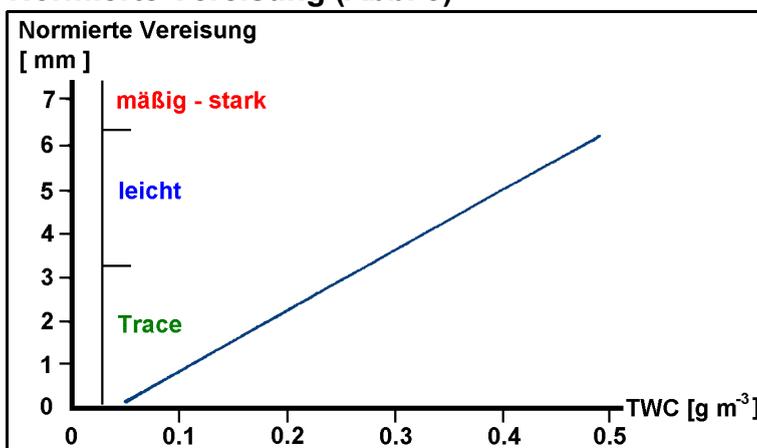
Diese sogenannte normierte Vereisung zeigt die Abbildung 5. Hier ist der Zusammenhang zwischen der Dicke und Intensität des Eisansatzes an einem Zylinder mit einem Durchmesser von 12.5 mm (normierte Vereisung) in Abhängigkeit vom totalen Wassergehalt (TWC) der Wolke, der aus Flüssigwasser und Eisteilchen besteht, dargestellt.

Zu erkennen ist, dass der normierte Eisansatz linear mit steigendem TWC zunimmt.

Normierte leichte Vereisung wurde von 0.30 bis 0.50 g m⁻³ beobachtet und bei TWC-Werten von über 0.5 g m⁻³ ist normierte mäßige bis starke Vereisung zu erwarten.

Normierte Vereisung (Abb. 5)

Quelle : [8]



Normierte Vereisung

Eisansatz, der sich in Strömungsrichtung an einem Metallzylinder mit einem Durchmesser von 12.5 mm auf einem Flugweg von 10 NM und einer Fluggeschwindigkeit von etwa 125 kn gebildet hat.

Die Temperatur betrug 0 bis -16 °C und Der mittlere Tröpfchendurchmesser der Wolken-elemente lag bei 13 bis 340 µm.

TWC

Gesamtwassergehalt (Total water content), der den Anteil an Flüssigwasser und Eisteilchen der Wolke beinhaltet.

Diese einfache Beziehung zwischen Flüssigwassergehalt und normierten Vereisungsgrad lässt sich in der Praxis leider nicht auf die Intensitätsstufen der tatsächlichen Flugzeugvereisung anwenden, da ihre Definitionen zu unpräzise sind und außerdem Schwierigkeiten bestehen, die Vereisungsgrade aus den Messergebnissen abzuleiten.

Die Ergebnisse von Forschungsflügen der DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt), die im Winter 1985/86 mit einer Do 28 durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Vereisungsrelevante wolkenphysikalische Größen (Tab. 11)

Intensitätsstufen der Vereisung	Lufttemperatur [°C]			TWC [g m ⁻³]			Mittlerer Tröpfchendurchmesser [µm]		
	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min.	Mittel
trace to light	-4.2	-10.8	-7.8	0.44	0.04	0.19	18.5	11.0	14.5
moderate to severe	-2.0	-7.9	-3.7	0.31	0.05	0.12	36.5	15.0	26.5

Quelle : [8]

Bei relativ hohen Temperaturen (Mittelwert -3.7 °C) und großen Tröpfchen (Mittelwert des mittleren Tröpfchendurchmessers 26.5 µm) wurde mäßige bis starke Vereisung an der Do 28 festgestellt. Signifikante Unterschiede des Gesamtwassergehaltes TWC sind jedoch laut Tabelle 11 nicht erkennbar.

Der mäßige bis starke Eisansatz an der Do 28 bildete sich an der Tragflächenunterseite. Bei relativ hohen Temperaturen und großen unterkühlten Tröpfchen gefriert nur ein Teil des Wassers sofort an der Flügelvorderkante, der andere Teil fließt unter die Flügeloberseite und erstarrt dort.

2.1.1.8 Berechnung des Flüssigwassergehaltes

Der Flüssigwassergehalt für cumuliforme und stratiforme Bewölkung kann mit den beiden folgenden, sehr vereinfachten Beziehungen abgeschätzt werden.

Näherungsformel zur Berechnung des Flüssigwassergehaltes (Form. 1)

$$LWC \approx \frac{1}{2.87} (r_B - r_h) \frac{p_h}{T_h}$$

- LWC : Flüssigwassergehalt [g m⁻³]
- 2.87 : individuelle Gaskonstante [hJ kg⁻¹ K⁻¹] trockener Luft
- r_B : Mischungsverhältnis [g kg⁻¹] an Wolkenbasis
- r_h : Mischungsverhältnis [g kg⁻¹] in Flughöhe
- p_h : Luftdruck [hPa] in Flughöhe [hPa]
- T_h : Temperatur [K] in Flughöhe

Quelle : [16]

Mit dem Flüssigwassergehalt LWC aus der Formel 1 lässt sich mit der Tabelle 12 für stratiforme und cumuliforme Wolken die Intensität des Eisansatzes bestimmen.

Intensität des Eisansatzes als Funktion des LWC (Tab. 12)

Wolke	Intensität S des Eisansatzes			
	Trace	leicht	mäßig	stark
cumuliform $S = 1.63 \text{ LWC} + 0.85$	S < 1	1 < S < 2	2 < S < 3	S > 3
stratiform $S = 2.2 \text{ LWC} + 0.82$				

Quelle : [16]

2.1.2 Größe der Tröpfchen

Der Durchmesser von Wolkentröpfchen liegt etwa im Größenordnungsbereich von 2 bis 100 µm, wobei die meisten Tropfen ein Format zwischen 5 - 15 µm besitzen (s. Tab. 13).

Tropfendurchmesser von flüssigen Hydrometeoren (Tab. 13)

Hydrometeor	Tropfendurchmesser [µm]	
	Spektrum	am häufigsten
Wolkentröpfchen	2 - 100	5 - 15
Sprühregentropfen	100 - 500	–
Regentropfen	500 - 6000	–

Quelle : [14]

Da Quellwolken im allgemeinen höhere Aufwindgeschwindigkeiten als Schichtwolken aufweisen, so dass auch größere Tröpfchen schwebend erhalten werden können, ist die Tropfengröße von der Wolkengattung abhängig (s. Tab. 14).

Wolkengattung und Größe der Wolkentröpfchen (Tab. 14)

Wolke		Tropfendurchmesser [µm]			
Gattung/Art	Tropfenzahl [cm ⁻³]	Mittelwert	am häufigsten	Minimum	Maximum
Cu hum, med	300	18	12	6	66
Cu con	64	48	12	6	166
Cb	72	40	10	4	200
Sc	350	8	7	2	24
As	450	10	9	2	26
Ns	330	12	8	2	40
St	260	12	8	2	44

Quelle : [8]

Tröpfchen mit einem Durchmesser von weniger als 20 µm gefrieren bei tiefen Temperaturen unter Einschluss von Luft fast sofort beim Aufprall an der Flugzeugoberfläche am Staupunkt (s. Abb. 2) fest und bilden Raueis.

Größere Tröpfchen fließen bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt vom Staupunkt weg, breiten sich vor dem vollständigen Erstarren schichtförmig über die Tragflügel und Zelle aus und formen Klareis.

2.1.3 Horizontale Ausdehnung von Wolken

Die Dauer eines individuellen Vereisungsvorganges ist von der horizontalen Mächtigkeit einer Wolke oder des Wolkensystems abhängig, die das Luftfahrzeug durchfliegt.

Wolken-Analysen, die mit Hilfe von Satellitendaten in mittleren Breiten der Nord-Atlantik-Region, der Gegend mit den meisten transatlantischen Flüge zwischen Europa und den USA, zeigten, dass mehr als die Hälfte der Wolkenschichten mit einem Bedeckungsgrad von 8/8 eine Fläche von weniger als 46 km² bedecken.

1.5 % der Wolken mit mittleren Untergrenzen zwischen 0.89 und 1.75 km weisen eine Größe zwischen 110 und 221 km² auf.

In Höhen von 6.1 und 7.32 km treten die größten Werte auf. In 6.1 km bedecken fast 3 % der Bewölkung etwa 110 bis 221 km² und in 7.32 km sind es beinahe 2 %, die eine Ausdehnung von 221 bis 442 km² zeigen.

Diese Zahlenwerte kennzeichnen jedoch nur die flächenmäßige horizontale Ausdehnung, so dass der Flugweg eines Luftfahrzeuges beim Durchqueren einer Wolkenschicht durchaus signifikant größer sein kann.

Vereisungsrelevante horizontal ausgedehnte Wolken oder Wolkensysteme treten in mittleren Breiten meist in Verbindung mit Fronten, Konvergenzlinien und Kaltlufttropfen auf. Besonders an Fronten kann die räumliche Ausdehnung von Schichtwolkensystemen mehrere 100 Kilometer in der Breite und etliche 100 bis einige 1000 Kilometer in der Länge betragen.

2.2 Aerodynamische Faktoren des Luftfahrzeuges

2.2.1 Auffang-Wirkungsgrad der Flugzeugoberfläche

Die Fähigkeit eines Luftfahrzeuges, die in der anströmenden Wolkenluft enthaltenen Wassertröpfchen einzufangen, der sogenannte Auffang-Wirkungsgrad, ist abhängig von

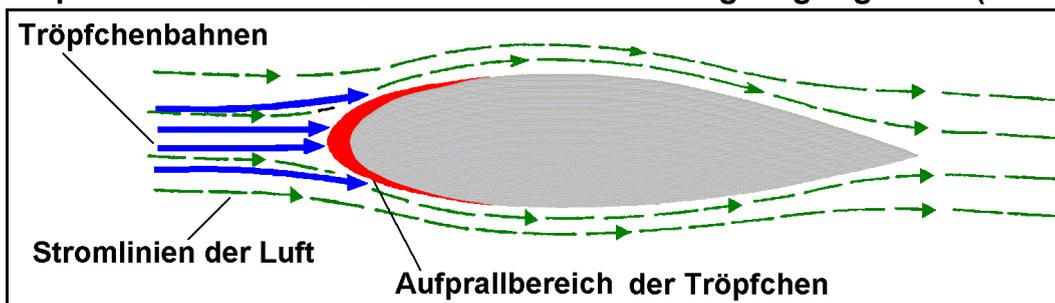
- dem Krümmungsradius des Luftfahrzeugprofils,
- der Fluggeschwindigkeit und
- der Größe der Wolken- bzw. Niederschlagströpfchen.

2.2.1.1 Krümmungsradius des Luftfahrzeugprofils

Weil Wassertröpfchen aufgrund ihrer größeren Masse träger sind als die anströmende Luft, folgen ihre Trajektorien nicht genau den Stromlinien der um die Flugzeugoberfläche herumgeführten Luft.

Luftfahrzeugprofile, die einen kleinen Krümmungsradius aufweisen, wie z.B. Tragflächenvorderkanten, Leitwerkprofile und Antennen, beeinflussen die anströmende Luft nur wenig, so dass der überwiegende Anteil von Wassertröpfchen aller Größen eingefangen wird.

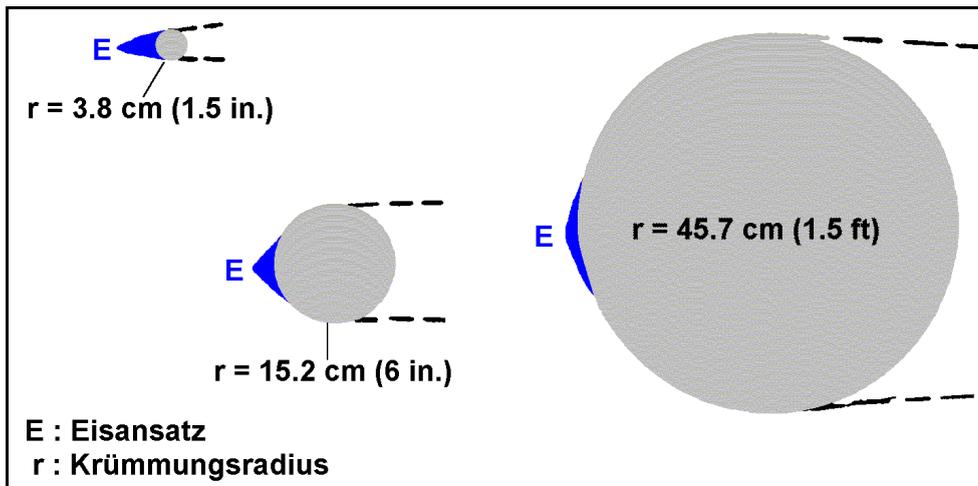
Tröpfchenbahnen und Stromlinien an einer Flugzeugtragfläche (Abb. 6)



Im Gegensatz dazu bildet sich im Luv von Flugzeugteilen mit großem Krümmungsradius ein Luftstau, der eine Ablenkung vieler Wolkentröpfchen zur Folge hat, so dass diese an der Luftfahrzeugoberfläche vorbeigeführt werden.

Flugzeugteile mit großem Krümmungsradius (Kabine, starke Tragflächen) fangen deshalb nur einen geringen Anteil von Wolkentröpfchen ein.

Profilgröße bzw -form und Eisansatz bei gleichen Vereisungsbedingungen (Abb. 7)



Quelle : [1]

Hat die Vereisung erst einmal begonnen, wird mit dem Eisansatz häufig der Krümmungsradius geringer, so dass der Auffang-Wirkungsgrad wächst.

Besonders vereisungsgefährdete Flugzeugteile sind Profile mit kleinem Krümmungsradius, wie z.B.

- Tragflächen- und Leitwerkvorderkanten,
- Luftschraubenblätter,
- Kanten der Ansaugschächte von Düsenmaschinen,
- Leitschaufeln von Turbopropmaschinen und
- Rotorblätter von Hubschraubern.

2.2.1.2 Fluggeschwindigkeit

Da das Trägheitsmoment der Wassertropfchen mit der TAS zunimmt, wächst die Anzahl der auftreffenden unterkühlten Tröpfchen mit der Fluggeschwindigkeit.

Jagdflugzeuge verfügen deshalb aufgrund ihrer hohen Fluggeschwindigkeit und ihres dünnen Tragflächenprofils über einen wesentlich größeren Auffang-Wirkungsgrad als zivile Verkehrsmaschinen.

2.2.1.3 Tröpfchenradius

Die Größe der auftreffenden unterkühlten Tröpfchen bestimmt nicht nur die Art des Eisansatzes - Durchmesser $< 20 \mu\text{m}$ ☞ Raueis und $\geq 20 \mu\text{m}$ ☞ Klareis -, sondern auch der Auffang-Wirkungsgrad der Flugzeugteile an unterkühltem Wasser ist eine Funktion ihres Umfangs, da ihre Trägheit mit zunehmender Größe ansteigt.

Bei einem gegebenen Flüssigwassergehalt einer Wolke ist der Auffang-Wirkungsgrad dem Anteil an großen Wolkentröpfchen direkt proportional.

Auffang-Wirkungsgrad und Tröpfchengröße (Tab. 15)

Tröpfchendurchmesser [10^{-6} m]	Auffang-Wirkungsgrad
	Fluggeschwindigkeit 175 kn; Krümmungsradius der Tragflächenvorderkanten 15 cm
20	10 - 20 %
40	40 %
60	60 %

2.2.2 Aerodynamische Erwärmung

Unterkühltes Wasser tritt in Wolken im Temperaturbereich von etwa 0 bis $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, jedoch ist die Nullgradgrenze als Untergrenze von Vereisungszonen für Flugzeugführer von schnellen Luftfahrzeugen nur ein Anhaltspunkt, da die Flugzeuggeschwindigkeit zu berücksichtigen ist. Die anströmende Luft bewirkt durch Kompression und Reibung eine Temperaturerhöhung der Flugzeugoberfläche, die als aerodynamische Erwärmung t_{aE} bezeichnet wird und eine Anhebung der Nullgradgrenze zur Folge hat (s. Form. 2).

Faustformel der aerodynamische Erwärmung (Form. 2)

$$t_{aE} \approx 0.8 \left(\frac{TAS}{100} \right)^2$$

$$\Delta H \approx 0.4 \left(\frac{TAS}{100} \right)^2$$

- t_{aE} : Aerodynamische Erwärmung [$^\circ\text{C}$]
- TAS : True air speed [kn]; Relativgeschwindigkeit zwischen der anströmenden Luft und dem Flugzeug
- ΔH : Anhebung der Nullgradgrenze [kft]

Quelle : [6]

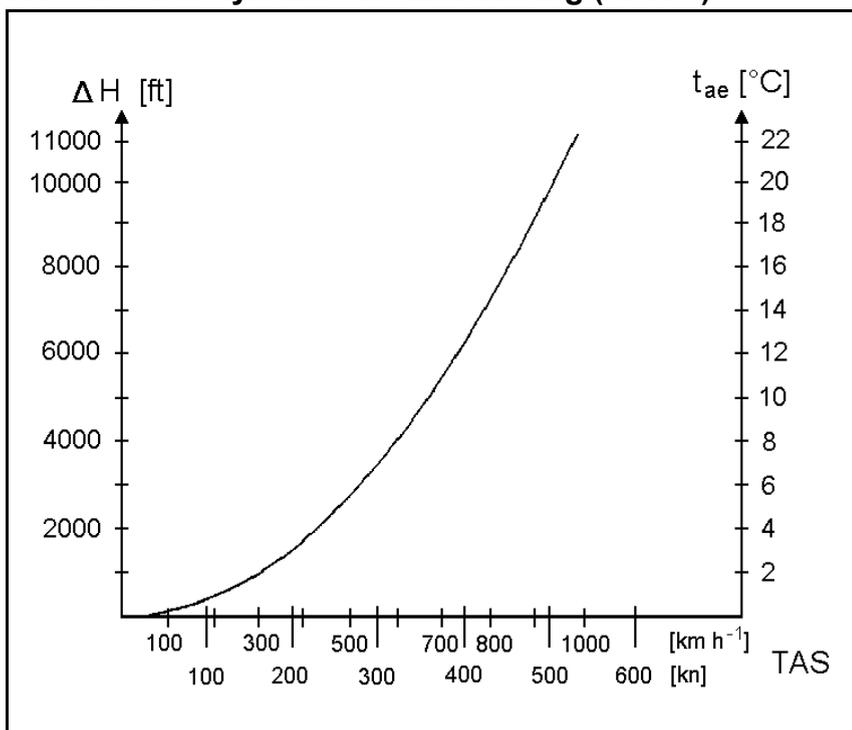
Die Temperaturerhöhung t_{aE} ist an den verschiedenen Teilen der Flugzeugoberfläche keineswegs einheitlich.

Die Kompressionserwärmung hat ihr Maximum an den Stirnkanten der Tragflächen und die Temperaturerhöhung durch Reibung ist am größten auf der Flügeloberfläche, da dort die TAS am höchsten ist. Die geringsten Werte der aerodynamischen Erwärmung sind an der hinteren Abdachung der Tragflächen im Bereich der Querruder anzutreffen.

Es ist durchaus möglich, dass die aerodynamische Erwärmung gerade genügend groß ist, um die Vereisung der Stirnkante der Tragflächen zu verhindern, jedoch nicht ausreicht, um die hintere Abdachung eisfrei zu halten.

Bei Hubschraubern hängt die auftretende aerodynamische Erwärmung von der Umdrehung der Rotorblätter ab. Die Vereisung beginnt deshalb im Bereich der geringsten Umdrehungsgeschwindigkeit, also am Rotorkopf. Mit abnehmender Außentemperatur schiebt sich der Eisansatz dann zu den Blattspitzen vor.

TAS und aerodynamische Erwärmung (Abb. 8)



Die Grafik 8 zeigt, dass bei Fluggeschwindigkeiten von 800 km h⁻¹ die aerodynamische Erwärmung etwa 15 °C beträgt, so dass signifikante Vereisung bei Wolkenflügen nicht mehr beobachtet wird. Bei einer TAS von 600 km h⁻¹ tritt zwischen 0 und -10 °C und um 900 km h⁻¹ bis -20 °C keine bedeutende Vereisung mehr auf.

3. Auswirkungen der Vereisung

Obwohl viele Luftfahrzeuge mit De- oder Anti-Icing-Anlagen ausgerüstet sind bzw. von einem Eis- oder Schneebelag vor dem Start befreit werden, ist starke Vereisung auch heute noch in der modernen zivilen Luftfahrt einer der unfallträchtigsten wetterbedingten Faktoren.

In den Jahren 1976 bis 1978 wurden 178 vereisungsbedingte Flugzeugunfälle registriert, von denen 100 einen tödlichen Ausgang hatten. Unfälle neueren Datums zeigt die Tabelle 16.

Unfälle, die Vereisung als Ursache haben (Tab. 16)

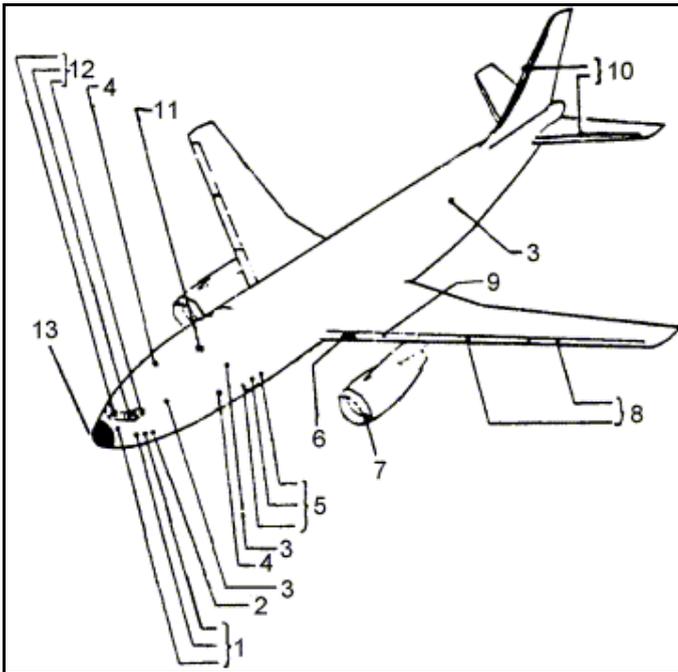
Datum	Flug-		Unfall		
	-zeugtyp	-phase	-ursache	-ort	-opfer
02.03.1980	Douglas B-26	Messflug	Vereisung in Wolken	Kalifornien/USA	4 Tote
13.01.1982	Boeing 737	Anfangssteigflug	Schnee auf den Tragflächen	Washington/ USA	78 Tote
15.10.1987	ATR 42	Steigflug	Vereisung in Wolken	Como/Italien	keine Überlebenden
10.03.1989	Fokker 28	Anfangssteigflug	Schnee auf den Tragflächen	D r y d e n / O n t a - rio/Kanada	24 Tote
08.11.1991	Cessna 310	Steigflug	Vereisung in Wolken	Darmstadt/ Deutschland	4 Tote
Weihn. 1991	nicht bekannt	Anfangssteigflug	Anfrieren von Sprühregen (Fuel-icing)	Stockholm/Schweden	keine Toten
22.03.1992	Fokker 28	Anfangssteigflug	Schnee auf den Tragflächen	New York/USA	27 Tote
13.12.1995	Antonow-24	Anfangssteigflug	Schnee auf den Tragflächen	Verona/Italien	49 Tote

Der Unfall am 02.03.1980 geschah während eines meteorologischen Forschungsfluges des Desert Research Institute (DRI) zur Untersuchung der Aufwindströmungen über der Sierra Nevada westlich von Reno und wurde messtechnisch bis zum Aufprall am Erdboden dokumentiert. Das Flugzeug, eine Douglas B-26 der DRI, war eine speziell für Messflüge ausgerüstete Maschine mit zwei Wissenschaftlern an Bord. Beide Piloten waren erfahrene Flieger, denen die Gefahren der Vereisung wohl vertraut waren.

Vereisung verursacht Veränderungen der Profilkontur und der Lastigkeit, eine Gewichtszunahme, Vibrationen von Propellern, Triebwerks-Leistungsabfälle und -schäden, ein Blockieren von Rudern, Ausfälle von Anzeigen und Funkanlagen und Sichtverluste.

In der Regel beginnt die Vereisung an der Bugspitze, den Vorderkanten der Tragflächen, den Steuerflächen, den Streben und Antennen und der Frontwindschutzscheibe. Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen die vereisungsgefährdeten Bereiche an einem Strahl- und Propellerflugzeug sowie einem Hubschrauber.

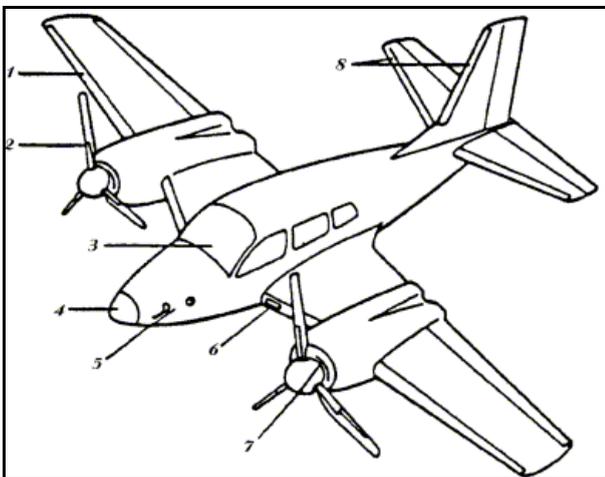
Vereisungsgefährdete Bereiche am Strahlflugzeug (Abb. 9)



Quelle : [1]

- 1 : Stauohre
- 2 : Außentemperaturfühler
- 3 : Abwasserauslässe
- 4 : Anstellwinkelgeber
- 5 : Statische Druckentnahmen
- 6 : Staulufteinlass
- 7 : Triebwerkslufteinlässe
- 8 : Vorflügel
- 9 : Flügelnasenkästen
- 10 : Nasenkästen der Leitwerke
- 11 : Klimaanlage-Luftauslass
- 12 : Führerraumscheiben
- 13 : Radom (Abdeckung des Wetterradargerätes an der Flugzeugnase)

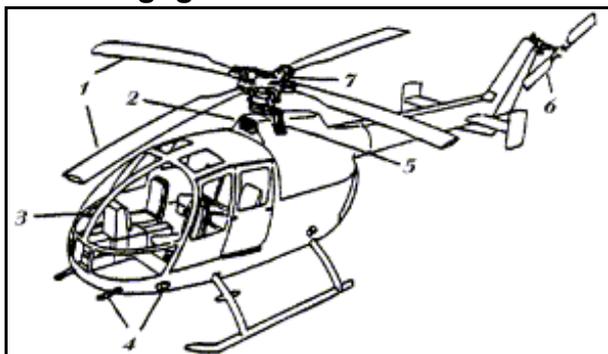
Vereisungsgefährdete Bereiche am Propellerflugzeug (Abb. 10)



Quelle : [1]

- 1 : Flügelnasenkanten
- 2 : Propellerblätter
- 3 : Führerraumscheiben
- 4 : Radom
- 5 : Stauohre u. statische Lufteinlässe
- 6 : Klimaanlage-Lufteinlass
- 7 : Triebwerkslufteinlässe
- 8 : Nasenkästen der Leitwerke

Vereisungsgefährdete Bereiche am Drehflügler (Abb. 11)



Quelle : [1]

- 1 : Hauptrotorblätter
- 2 : Triebwerkslufteinlass
- 3 : Windschutzscheiben
- 4 : Staurohre u. statische Lufteinlässe
- 5 : Steuerungssysteme
- 6 : Heckrotorblätter
- 7 : Rotorkopf

a) Veränderung der Profilkontur

Die Folge der aerodynamischen Veränderungen an den Tragflügel- und Leitwerkprofilen, die natürlich stark von der Dicke und Oberflächengestalt des Eisansatzes abhängen, ist eine Erhöhung des Luftwiderstandes und ein Auftriebsverlust.

Dadurch steigt die Mindestfluggeschwindigkeit (Stall speed) und die maximale Horizontalgeschwindigkeit nimmt ab. Um die Flughöhe einzuhalten, muss der Flugzeugführer deshalb den Auftrieb durch eine höhere Triebwerksleistung vergrößern.

Das Zusammenwirken von Auftriebsverlust, höherem Luftwiderstand und der Gewichtszunahme kann so ausgeprägt sein, dass der Pilot trotz maximaler Triebwerksleistung nicht mehr in der Lage ist, die Flughöhe zu halten.

Die Firma Boeing führte vor einiger Zeit Windkanal-, Simulations- und Flugversuche durch, um den Einfluss von Eis und Schnee auf Tragflächen und Klappen zu untersuchen. Für diese Tests mit einer zweistrahligen Boeing 737 wurden zwei verschiedene Oberflächenrauigkeiten gewählt, die aus aufgespritzten und anschließend aufgerauten Kunstharz bestanden.

Künstlicher Rauhreifbelag und Flugeigenschaften (Tab. 17)

Änderung der Flugeigenschaften einer Boeing 737	Dicke des künstlichen Rauhreifbelages		
	1 mm	2.5 mm	
Gesamtauftriebsverlust	18 %	32 %	
Zunahme der Stall speed	14 kn	24 kn	
Abnahme der Steiggeschwindigkeit mit	beiden Triebwerken	5 %	8 %
	einem Triebwerk	50 %	Höhe nicht einhaltbar

Quelle : [Aerokurier 10/1984]

Welche entscheidende Rolle der Auftriebsverlust spielt, verdeutlicht das Flugzeugunglück vom 13.01.1982 in Washington (s. Tab. 16).

Eine Boeing 737, die trotz eines Schnee- und Eisbelages von etwa 1.2 cm (0.5 in) auf den Tragflächen startete und deshalb nach dem Abheben nicht genügend an Höhe gewinnen konnte, kollidierte etwa nach 1 Meile mit der Brücke der 14. Straße über den Pontomac-River und stürzte in den eisbedeckten Fluss. Dabei starben 74 der 79 Flugzeuginsassen und 4 Personen, deren Autos auf der Brücke vom Heck der B737 zerstört wurden.

b) Gewichtszunahme und Lastigkeitsänderung

Ein dm^3 Eis wiegt, je nach Art des Eisansatzes, zwischen 0.5 und 1 kg (s. Tab. 1, 2). Besonders Klareisansätze führen zu einer relevanten Zunahme des Flugzeuggewichts. Bei schwerer Vereisung können sich durchaus 10 kg Eis pro Meter Profil- und Streben-vorderkante an einem Luftfahrzeug festsetzen. Selbst bei kleinen Flugzeugen ist eine Gewichtszunahme von mehr als 150 kg denkbar, wenn der Eisansatz nicht rechtzeitig wieder entfernt wird.

Da die größten Außenflächen eines Flugzeuges sich meist hinter dem Schwerpunkt befinden, kann die Maschine bei einem flächigen Klareisansatz auch noch schwanzlastig bzw. im Extremfall nicht mehr steuerbar werden.

c) Asymmetrie und Schwingungserscheinungen

Asymmetrischer Eisansatz an Propellerblättern und Rotoren kann Vibrationen verursachen, die bis zu einem Ausbrechen des Motors führen können.

Löst sich ein signifikanter Eisansatz lediglich auf einer Tragflächenseite, so ist das Luftfahrzeug nur noch oberhalb einer Geschwindigkeit um die Längsachse steuerbar, die weit über der normalen Landegeschwindigkeit liegen kann.

Durch ungünstige Massenverhältnisse und Profilveränderungen können auch vereiste Ruder gefährliche Leitwerkschwingungen auslösen.

d) Blockieren der Ruder

Ruderspalt stellen Unstetigkeitsstellen im Profilverlauf des Flugzeuges dar, die ähnlich vereisungsgefährdet sind wie die Vorderkanten. Bei längeren Flügen in Vereisungszonen können Ruderspalt durch den Eisansatz zuwachsen, so dass Ruder blockiert werden.

Auch Reifansätze an Klappen, Höhen- und Seitenrudern beeinträchtigen die Beweglichkeit der frei arbeitenden Teile.

e) Leistungsabfall und Schäden an Triebwerken

Kolbenmotoren können durch Vergaservereisung und durch Eisansatz am Luftfilter an Leistung verlieren bzw. ausfallen. Mit Vergaservereisung muss bei Temperaturen unter $+18^\circ\text{C}$ und hoher Luftfeuchte gerechnet werden, da durch die Expansion der Ansaugluft und der Verdunstung des Benzins ein Temperaturrückgang bis zu 30°C eintritt.

Leistungseinbußen an Turbinen- und Turboprop-Triebwerken können durch Störungen der Strömungsverhältnisse am Lufteinlauf infolge Eisansatz hervorgerufen werden.

Bei Flugzeugen mit Heckantrieb besteht außerdem die Gefahr, dass vom Flügel ab-gelöste Klareisbrocken von den Triebwerken angesaugt werden und zu großen Beschädigungen oder sogar zu deren Erlöschen führen können.

f) Ausfall von Anzeigen und Funkanlagen

Durch Vereisung ausfallen können alle Instrumente, die von der Außenluft umströmte Sensoren aufweisen. Dazu gehören Fahrtmesser, Höhenmesser, Variometer, Überziehwarnanlagen und Anstellwinkelanzeigen. Da alte Anzeigewerte durch Vereisung regelrecht konserviert werden, ist der Ausfall vom Luftfahrzeugführer nur dann festzustellen, wenn die Instrumente aufmerksam überwacht werden.

Dünne Antennen können bei starkem Eisansatz durch den hohen Luftwiderstand und die Gewichtsüberlastung abgerissen werden. Außerdem wirkt der Eismantel auf manche Antennen (z.B. Sprechfunk) derart dämpfend, dass die Funkanlage nicht mehr zu benutzen ist. Selbst Reifansätze an Antennen vermindern den Funkempfang.

Bei starker Vereisung der RADAR-Antennenabdeckung ist das Bild derart gestört, dass es unbrauchbar ist.

g) Sichtverlust

Frontscheiben können im extremen Fall durch Eisansatz völlig undurchsichtig werden, so dass die Flugzeugführung trotz der in der Regel eisfrei bleibenden Seitenscheiben außerordentlich beeinträchtigt wird. Von besonderer Bedeutung ist dabei die räumliche Desorientierung des Piloten durch den Sichtverlust.

4. Schutz vor Vereisung

Die Betriebsordnung für Luftfahrtgerät (LuftBO) schreibt vor, dass bei Flügen unter Wetterbedingungen, bei denen Vereisung zu erwarten ist, alle Luftfahrzeuge mit Einrichtungen zur Verhütung (Anti-Icing) oder zur Beobachtung und Beseitigung (De-Icing) von Eisansatz ausgerüstet sein müssen. Diese Maßnahmen betreffen damit alle Luftfahrzeuge, die nach Instrumentenflugregeln operieren, also die gesamte zivile Verkehrsfluffahrt und auch einen kleinen Teil der Allgemeinen Luftfahrt.

Die kritischen Flugphasen, die Schutzmaßnahmen vor Vereisung erfordern, sind der Steig-, Sink- und Landeanflug.

Die vier gebräuchlichsten Anlagen der Eisverhütung und -beseitigung sind die pneumatisch/mechanische Enteisung, die Flüssigkeitsenteisung bzw. Eisverhütung, die Warmluftenteisung bzw. Eisverhütung und die Enteisung bzw. Eisverhütung durch elektrische Beheizung der vereisungsgefährdeten Bereiche.

Die Anwendung der verschiedenen Methoden hängt von der Art und Form des jeweiligen Luftfahrzeugtyps ab.

Pneumatische Enteisungsanlagen, die zu den frühesten Methoden des Vereisungsschutzes zählen, sprengen die Eisansätze an den Flügel- und Leitwerksvorderkanten und ggf. am Radom (Abdeckung des Wetteradargerätes an der Flugzeugnase) ab. Dies geschieht durch ein intervallgesteuertes Aufblasen und Leerpumpen von Gummimatten, die an diesen Sektionen aufvulkanisiert sind.

Bei der Flüssigkeitsenteisung wird Alkohol verwendet, der, sobald er mit Wasser vermischt wird, den Gefrierpunkt erniedrigt. Dieses Verfahren kann sowohl zur Eisverhütung als auch zur Enteisung eingesetzt werden.

Auch die von den Triebwerken erzeugte Wärme wird zur Enteisung bzw. Eisverhütung eingesetzt. Bei der Warmluftverhütung wird den zu schützenden Luftfahrzeugteile so viel Wärme zugeführt, dass die auftreffenden Tropfen verdampfen bzw. diese Bereiche eisfrei gehalten werden.

Im Warmluftenteisungssystem wird das sich bildende Eis durch Abschmelzen periodisch entfernt.

Die elektrische Enteisung bzw. Eisverhütung funktioniert grundsätzlich so wie die durch Abwärme, jedoch ist meist nicht genügend elektrische Energie vorhanden, so dass dieses Verfahren sich generell auf Führerraumscheiben, kleine Lufteinlässe und besonders gefährdete Regionen beschränkt.

Verfügt das Luftfahrzeug nicht über eine Eis-Anzeige-Anlage, muss der Pilot die Tragflächen und Cockpitfenster bei Außentemperaturen von unter 0 °C - jedes Luftfahrzeug ist mit einem Aussenthermometer ausgerüstet - kontrollieren. Viele Luftfahrzeuge besitzen deshalb Flügelanstrahlleuchten, die auch nachts eine Beobachtung der Flügel-nasenkanten zulassen.

Eine weitere Möglichkeit zur Eiskontrolle ist die Montage eines beheizten Stabes (Hot rod) im Blickfeld des Piloten. Einige schnelle Flugzeuge haben auch Eiswarngeräte, die den Eisansatz durch eine Lampe im Cockpit anzeigen.

Weil die flugzeugeigenen Enteistungssysteme am Boden nicht verwendet werden können, müssen die am Flugzeug haftenden festen Hydrometeore vor dem Start entfernt werden. Ein sicherer Flugbetrieb ist unmöglich, wenn das Flugzeug und vor allen Dingen seine aerodynamischen Flächen, die für Auftrieb, Steuerung und Stabilität sorgen, nicht von Eis und Schnee befreit sind.

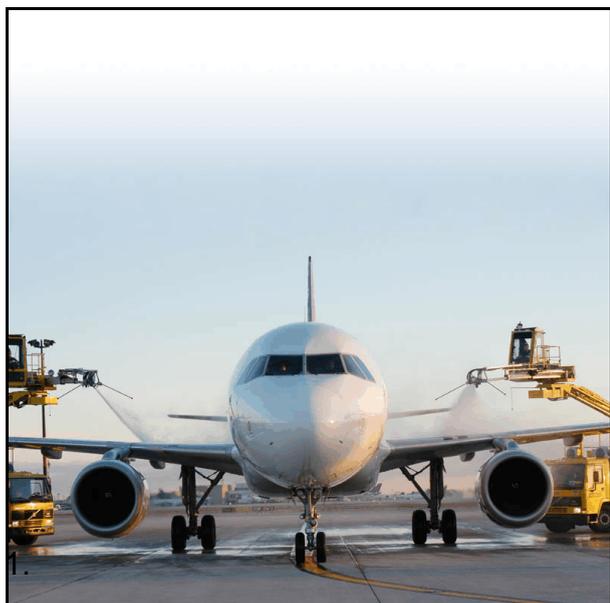
Um die Start- und Landebahnen, Taxiways und das Vorfeld des Flughafens Frankfurt/Main im Winter möglichst schnee- und eisfrei halten zu können, verfügt der Winterdienst über ca. 25 Schneepflüge, 24 Kehr-Blas-Geräte, 5 Schneeschleudern, 1 Ladefröse, 3 Streugeräte für Sand, 8 Flüssig-Enteiser und 2 Radlader.

Schneebedecktes Flugzeug auf dem Flughafen La Guardia (New York) und Flüssigkeitsenteisung eines Verkehrsflugzeuges (Abb. 12)



Quelle : [Darmstädter Echo (ap); Montag, 15. März 1994]

Der Flughafen La Guardia (New York/USA) versank am Wochenende (13., 14. 03.94) im Schnee; er wurde ebenso wie die beiden anderen Airports von New York geschlossen. Auch in Washington, Baltimore, Boston, Philadelphia, Pittsburgh und Atlanta waren Start und Landung unmöglich.



[Quelle : 18]

Der Eis- oder Schneebelag einer Verkehrsmaschine wird mit zwei Flüssig-Enteisern entfernt. Hierbei wird ein bis auf 80 °C aufgeheiztes Glykolgemisch auf die Flugzeugoberfläche aufgesprüht. Wichtig bei der Anti-Icing-Flüssigkeit ist, dass sie möglichst lange auf der Oberfläche haftet, sich aber bei einer Geschwindigkeit von rund 144 Kilometer pro Stunde zu lösen beginnt und spätestens bei 170 Kilometer pro Stunde ganz entfernt ist, um die Aerodynamik der Maschine nicht zu stören. Bei 260 Kilometer pro Stunde hebt das Flugzeug dann ohne Enteistungsmittel ab.

[Quelle: 17]

5. Vereisungsmerkmale von Wolken

5.1 Zusammenfassung der bestimmenden Faktoren

Temperatur, Flüssigwassergehalt, Niederschlag, Tropfengröße und horizontale Ausdehnung sind die hauptsächlichsten vereisungsbestimmenden wolkenphysikalischen Faktoren.

Die Art der Vereisung ist dabei von der Tropfengröße und die Vereisungsstärke vom Flüssigwassergehalt und der Tropfengröße abhängig.

a) Temperatur in der Wolke

Die Auftretswahrscheinlichkeit von Vereisung ist bei Temperaturen von über -2 °C und unter -36 °C annähernd null (Air Weather Service 1964, 1980).

Die vereisungsauslösende Temperatur hängt ab von der aerodynamischen Erwärmung, die eine Funktion der Flughöhe und True airspeed ist. Damit Vereisung auftreten kann, muss der Betrag der Unterkühlung den der aerodynamischen Erwärmung übertreffen.

Allgemein gilt, dass die Häufigkeit der Vereisung mit abnehmender Temperatur geringer wird und die Auftretswahrscheinlichkeit unter -22 °C weniger als 10 % beträgt (Air Weather Service 1964, 1980).

Vereisung tritt vorwiegend im Höhenbereich von 4000 - 8000 ft (1200 - 2400 m) über Grund auf, und zwar am häufigsten bei Temperaturen von -4 bis -6 °C .

Grundsätzlich kann jedoch in jedem Wolkenbereich Vereisung einsetzen, sofern die Temperatur niedriger als -2 °C ist und unterkühlte Wolkentropfchen vorhanden sind. Eine statistische Auswertung der Vereisungshäufigkeit für das Höhenintervall von 700 bis 500 hPa ergab, dass in 90% aller Fälle Vereisung beobachtet wurde, wenn diese Bedingungen erfüllt waren.

Untersuchungen zeigten, dass der Flüssigwassergehalt an der Untergrenze einer Wolke oftmals verlustlos durch stärkere Aufwärtsbewegungen in höhere Schichten transportiert wird.

Da aber eine hohe Wolkenbasistemperatur einen hohen Flüssigkeitswassergehalt bedeutet, ist die Vereisungswahrscheinlichkeit in diesem Fall in der gesamten Wolke größer als bei niedrigen Temperaturen an der Wolkenuntergrenze.

b) Flüssigwassergehalt

Der Betrag an unterkühltem, flüssigen Wolkenwasser ist der Schlüsselparameter der Flugzeugvereisung.

Besonders Wolken mit stärkeren Aufwindgeschwindigkeiten - bei einem geringen Verlust an Flüssigwasser durch Entrainment - zeigen hohe Werte.

In aktiver frontaler Bewölkung kann deshalb ein wesentlicher Anteil an unterkühltem Wasser auch unter -15 °C existieren, trotzdem Eisteilchen aus höheren Schichten in diesen Wolkenbereich hineinfallen. In konvektiven Wolken sind sogar hohe Flüssigwasserwerte bei noch tieferen Temperaturen möglich.

Die statische Stabilität oder Temperaturschichtung bestimmt weitgehend über die Aufwindgeschwindigkeit die Tröpfchengröße und damit die Art des Eisansatzes. In labilen Wolken tritt häufig Klareis auf, während in stabilen Raueis überwiegt.

Jede Variation der Aufwindgeschwindigkeit führt zu einer Änderung des Flüssigwassergehaltes der Wolke. Zusätzliche Hebungsprozesse wie z.B. Stau bewirken deshalb einen höheren Flüssigwassergehalt.

c) **Tröpfchengröße**

Der Auffang-Wirkungsgrad eines Flugzeuges nimmt mit der Tropfengröße zu.

Tröpfchen mit einem Durchmesser von weniger als $20\text{ }\mu\text{m}$ gefrieren bei tiefen Temperaturen unter Einschluss von Luft fast sofort beim Aufprall auf die Flugzeugoberfläche am Staupunkt und bilden Raueis. Größere Tröpfchen fließen bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt vom Staupunkt weg und breiten sich vor dem vollständigen Erstarren zu Klareis schichtförmig über die Tragflügel und Zellen aus.

d) **Niederschlag**

Die Bedeutung des Niederschlages als ein Hinweis auf potentielle Flugzeugvereisung ist widersprüchlich. Eine Untersuchung stellte fest, dass kaum Vereisung in Niederschlagswolken angetroffen wurde, während eine andere eine Zunahme der Vereisungswahrscheinlichkeit beim Vorhandensein von Niederschlag ergab.

e) **Horizontale Ausdehnung der Wolken**

Die Dauer eines individuellen Vereisungsvorganges ist von der horizontalen Mächtigkeit einer Wolke abhängig, die das Luftfahrzeug durchfliegt.

Besonders gefährlich sind damit horizontal ausgedehnte Wolkensysteme, die mäßig und/oder starke Vereisung verursachen. Dazu zählen aktive Fronten, markante Tröge und Kaltlufttropfen.

f) **Auffang-Wirkungsgrad und aerodynamische Erwärmung**

Der Auffang-Wirkungsgrad eines Luftfahrzeuges wächst mit abnehmendem Krümmungsradius, steigender Fluggeschwindigkeit und zunehmendem Tröpfchenradius.

Besonders vereisungsgefährdet sind deshalb Flugzeugprofile mit kleinem Krümmungsradius - wie z.B. Tragflächen- und Leitwerkvorderkanten, Luftschraubenblätter, Kanten der Ansaugschächte von Düsenmaschinen, Leitschaufeln von Turbopropmaschinen und Rotorblätter von Hubschraubern.

Hat die Vereisung erst einmal begonnen, so verringert sich häufig mit dem Eisansatz auch der Krümmungsradius, so dass der Auffang-Wirkungsgrad wächst.

5.2 Vereisung in Schicht- und Quellwolken

Schicht- und Quellwolken weichen in ihrem vereisungsspezifischen Erscheinungsbild erheblich voneinander ab.

Da die Wolkengattung eine Funktion der Art der temperaturabhängigen Wolkenelemente und ihrer räumlichen Verteilung in der Troposphäre ist, lässt sich eine unmittelbare Beziehung zwischen Gattung, Art und Stärke des Eisansatzes herstellen.

Wolkengattung und Vereisung (Tab. 18)

Wolke		Elemente	Temperaturbereich	Vereisung	
Gattung, Art	Merkmal			Intensität	Art
Cu hum, med	Quellwolke	○, ●	-2 bis -12 °C	leicht	Klareis
Cu con		○, ●	-2 bis -12 °C -9 bis -15 °C	mäßig - stark	Mischeis
Cb		○, ●, ↔, ★, ☆	-2 bis -12 °C	leicht - stark	überwiegend Klareis
		○, ●, ↔, ★, ☆, ◇, ◆, ■	-10 bis -15 °C -15 bis -25 °C		Mischeis überwiegend Rau eis
Sc str (dünn)	Schichtwolke	○, ●, (★, ☆, ◇)	-2 bis -12 °C	leicht	überwiegend Rau eis
Sc str (dick)				mäßig (im Stau auch stark)	
Ac str (dünn)		●, ↔, (○)	-5 bis -20 °C	leicht	
Ac str (dick)				mäßig	
St		○, ●, (↔, ⊕)	-2 bis -12 °C	leicht - mäßig	
As		●, ↔, ★, ☆	-2 bis -12 °C	leicht mäßig (bei Hebung feuchtwarmer Luft)	
Ns		○, ●, ↔, ★, ☆	-12 bis -25 °C -2 bis -12 °C	leicht	
	mäßig bis stark				

Erläuterung der Symbole			
Wassertröpfchen, nicht unterkühlt	○	Wassertröpfchen, unterkühlt	●
Eiskristalle	↔	Schneegriesel	⊕
Schneesterne	★	Schneeflocken	☆
Reifgraupeln	◇	Frostgraupeln	◆
Hagel	■	(.....)	selten auftretend

Schichtwolken oder stratiforme Bewölkung bilden sich in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Typische Merkmale während ihrer aktiven Entwicklung sind deshalb ihre große horizontale Mächtigkeit im Verhältnis zu ihrer Schichtdicke und ihre schwachen Vertikalbewegungen.

Quellwolken oder cumuliforme Wolken dagegen entstehen bei einer labilen thermischen Schichtung. Sie zeigen während ihrer aktiven Wachstumsphase daher heftige Vertikalbewegungen; ihre bedeutendsten Gattungen sind der Cu und Cb.

5.2.1 Schichtwolken

Die Vereisungszone in Schichtwolken des unteren und mittleren Stockwerkes beschränkt sich im allgemeinen auf eine Dicke von etwa 3000 bis 4000 ft. Die Vereisungsintensität ist meist leicht bis mäßig und es tritt häufig Eisansatz in Form von Raueis bzw. ein Gemisch von Rauh- und Klareis auf.

Die große Gefahr der Vereisung liegt hier überwiegend in der enormen horizontalen Ausdehnung der Schichtwolken und damit auch der Vereisungszonen.

Schichtwolken des oberen Stockwerkes (Cs, Cc) bilden sich bei Temperaturen von unter -35°C und bestehen überwiegend aus Eiskristallen, so dass die Vereisungswahrscheinlichkeit in ihnen minimal ist.

5.2.2 Quellwolken

Im Gegensatz zur Schichtbewölkung weisen die Vereisungszonen in Quellwolken eine geringere horizontale Erstreckung, aber eine wesentlich größere vertikale Ausdehnung auf.

Die Vereisungsformen sind in diesen Wolken sehr unterschiedlich, da viele der vereisungsfördernden Faktoren vom Entwicklungszustand der konvektiven Wolke abhängig sind. Die Vereisungsstärke schwankt zwischen leichter Vereisung in unterkühlten Cu hum, med und mäßiger bis schwerer Vereisung in Cu con bzw. Cb.

In Cu con ist Vereisung in allen Schichten oberhalb der 0° -Isotherme zu finden, mit einem Maximum im oberen Wolkenteil. Die stärkste Vereisung tritt in einem Cu con kurz vor seiner Umwandlung in einen Cb cal auf.

Im Reifestadium des Cb ist die Vereisung auf die Gebiete mit starker Aufwärtsbewegung beschränkt. Deswegen führt in mächtigen konvektiven Wolken ein Ausweichen des Piloten in größere Höhen nicht zu einer Verringerung des heftigen Eisansatzes, sofern die Außentemperatur über -23 °C liegt.

Selbst bei tieferen Temperaturen kann noch die Gefahr von schwerer Vereisung bestehen.

Alternde Gewitter dagegen weisen nur eine langgestreckte Vereisungszone in der Nähe der Nullgradgrenze auf.

Manchmal verschmelzen mächtige orographische oder frontale Quellwolken zu mehreren Hekto- und einigen Dekakilometern breiten Wolkenbändern, so dass die Zellen mit stärkster Vereisungsintensität schwer auszumachen sind und die Vereisungszone horizontal extrem ausgedehnt ist.

5.3 Vereisung an Fronten

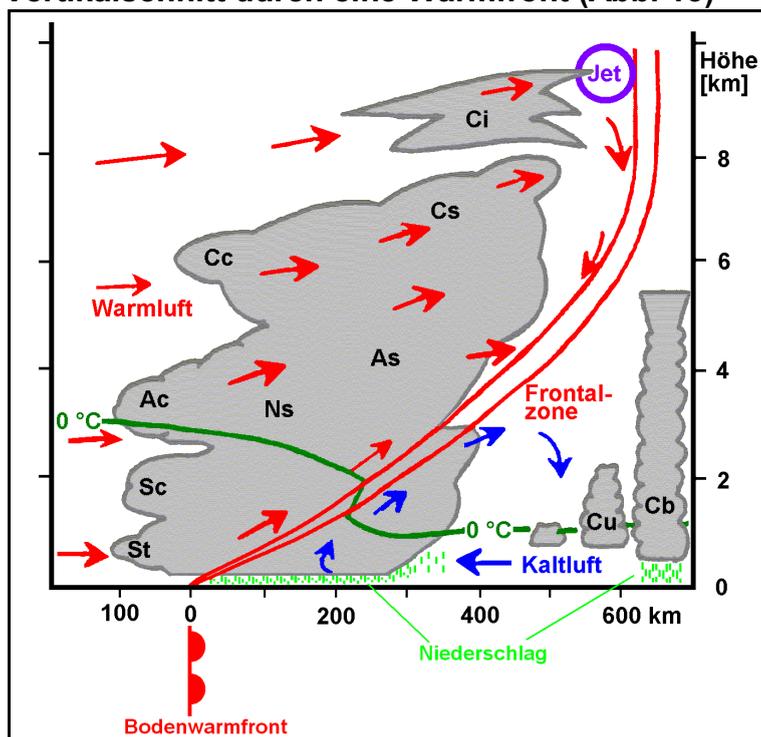
85% aller Vereisungsfälle treten in Frontbereichen auf. Der Grund hierfür ist, dass ausgedehnte und hochreichende Wolkensysteme meist an Fronten gebunden und in Frontbewölkung meist genügend starke Hebungsprozesse vorhanden sind, die unterkühlte Wassertröpfchen in höhere Schichten transportieren.

Da die Wolkenstrukturen in Fronten und die zugehörigen Tiefdrucksysteme äußerst komplex ausgebildet sein können und zeitlichen Veränderungen unterworfen sind, ist selbst die idealisierte Darstellung der Vereisung an Fronten sehr schwer.

5.3.1 Warmfronten

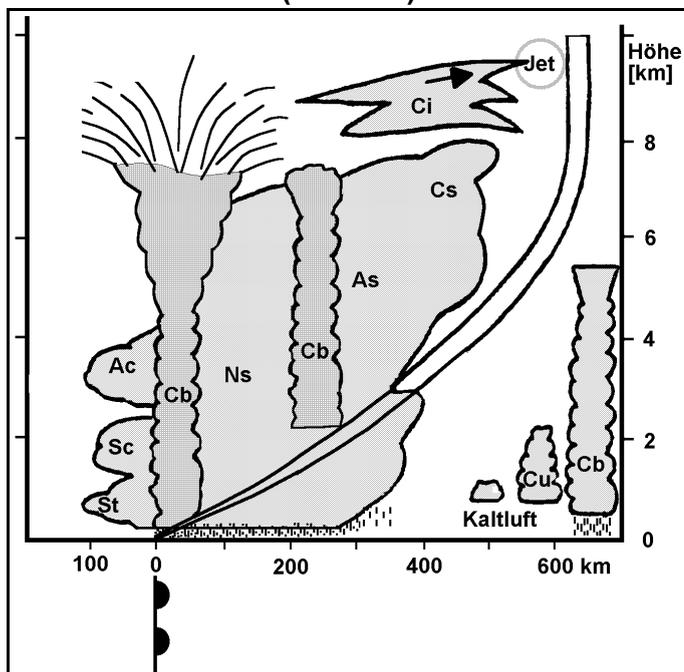
Vereisungszonen weisen an Warmfronten die größte horizontale Ausdehnung auf. Eisansatz an Luftfahrzeugen kann ober- und unterhalb der Frontalzone auftreten, wenn die Temperatur über der frontalen Inversion größer 0 °C und unter derselben kleiner als 0 °C ist. Oberhalb der Frontalzone ist die Vereisungsschicht, von der Nullgradgrenze aus gerechnet, meist nicht dicker als 3000 ft.

Vertikalschnitt durch eine Warmfront (Abb. 13)



Die Neigung der Frontalzone ist in dieser Abbildung extrem überhöht dargestellt. In der Natur verläuft die Frontalzone in der Reibungsschicht sehr flach, und ihre Neigung beträgt in der mittleren Troposphäre etwa 1 : 100.

Labile Warmfront (Abb. 14)



Quelle : [4]

Manchmal ist die aufgleitende Wärmeluft bei kräftigen Wärmeluftvorstößen aus südlicher Richtung nur wenig stabil, so dass sie durch den Hebungsprozess labilisiert wird. In die Schichtbewölkung sind dann Quellwolken eingelagert.

Die vorherrschende Vereisungsform der überwiegend stabilen Warmfront (s. Abb. 13) ist Raueis. Vereisung kann bereits weit vor der Bodenwarmfront zu finden sein. Schon in den unteren Schichten des As, etwa 300 nm (ca. 500 km) vor der Bodenfront, wurde leichter Raueisansatz festgestellt.

Bei intensiven Aufgleitvorgängen ist im As und besonders im Ns mäßiger bis starker Eisansatz möglich.

Manchmal ist die aufgleitende Warmluft bei kräftigen Warmluftvorstößen aus südlicher Richtung nur wenig stabil, so dass sie durch den Hebungsprozess labilisiert wird. Innerhalb des Nimbostratus tritt dann starke Rauheisbildung auf, und in den in die Schichtbewölkung eingelagerten Quellwolken (s. Abb. 14) ist zusätzlich starker Klareisansatz zu finden.

Besonders gefährlich ist an Warmfronten der gefrierende Niederschlag, da dadurch schlagartig die gesamte Flugzeugoberfläche stark vereisen kann (s. 4.3.4).

5.3.2 Kaltfronten

Kaltfronten zeigen ein sehr unterschiedliches Erscheinungsbild. Sie treten als Kata-Kaltfronten (s. Abb. 16) in den Kernbereichen von Zyklonen und in den äußeren Regionen eines Tiefs als Ana-Kaltfronten (s. Abb. 15) auf.

Durch die kräftige Hebung aufgrund der in der Reibungsschicht relativ steil verlaufenden Frontalzone kann die Frontpassage besonders im Sommer mit konvektiver Bewölkung und damit Schauern und Gewittern verbunden sein.

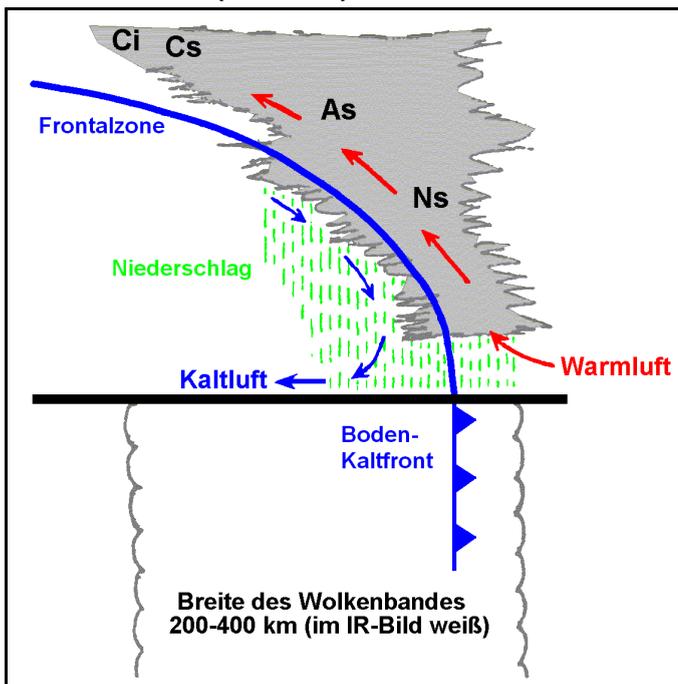
An ein und derselben Front lässt sich deshalb häufig ein zeitlich und räumlich rascher Wechsel des Wolkenbildes feststellen, so dass auch Stärke und Art des Eisansatzes variieren.

Grundsätzlich gilt, dass an Kaltfronten die vertikale Ausdehnung der Vereisungszonen meist größer als an Warmfronten ist, da sich der Flüssigwasserbereich aufgrund der kräftigeren Hebung in höhere Zonen verlagert.

Ana-Kaltfronten weisen dabei infolge der warmfrontartigen, jedoch postfrontal angeordneten Schichtbewölkung meist eine warmfrontähnliche Vereisung auf.

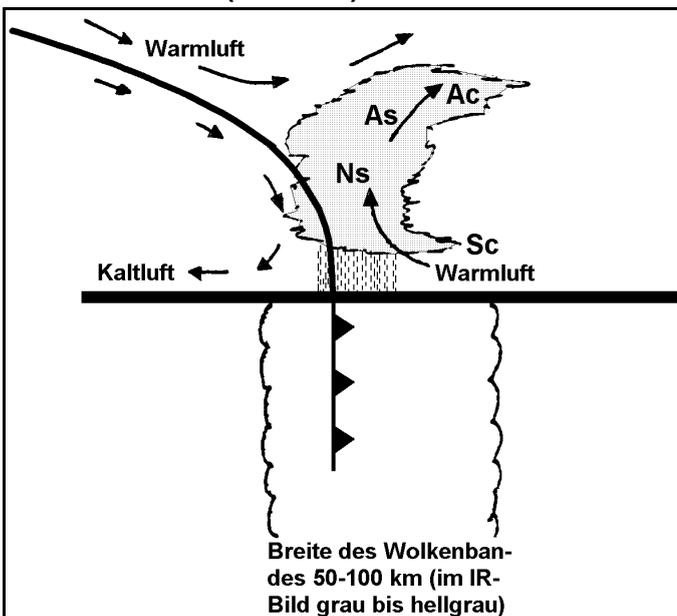
Kata-Kaltfronten dagegen sind oft aufgrund der starken Hebung im Bereich des Böenkopfes mit Quellwolken durchsetzt, so dass Vereisung meist in Form von Klareis hauptsächlich in den Aufwindschläuchen mit Vereisungsmaxima im Bereich der stärksten Quellungen an der Bodenfront angetroffen wird.

Ana-Kaltfront (Abb. 15)



Besonders in der warmen Jahreszeit treten in mittleren Breiten im Bodenfrontbereich Cb mit Schauern oder Gewittern auf.

Kata-Kaltfront (Abb. 16)



Besonders im Sommer, aber auch im Winter treten, in den Ns eingelagert, Cb auf, die hier nicht eingezeichnet sind.

Böenkopf
Steile Frontalzone in der Reibungsschicht

5.3.3 Okklusionen

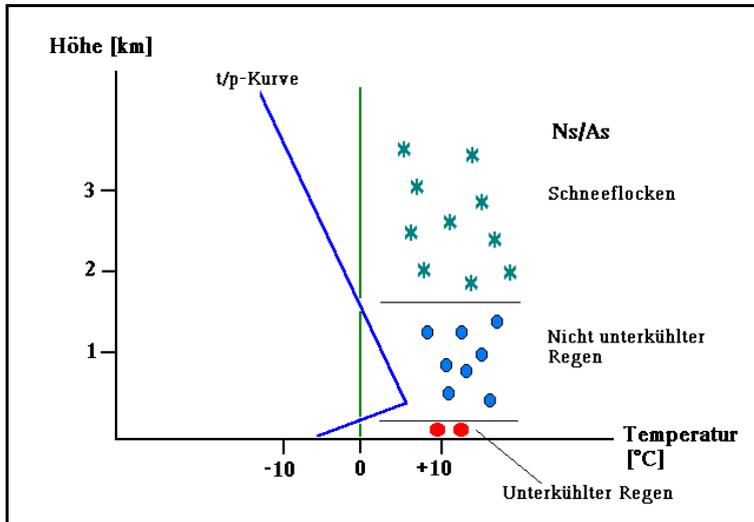
Die Vereisung in Okklusionen entspricht prinzipiell der Vereisung in Warm- oder Kaltfronten, je nachdem, ob es sich um eine Warm- bzw. Kaltfrontokklusion handelt.

5.3.4 Unterkühlter Regen oder Sprühregen

Unterkühlter Regen kann im Kaltluftkeil vor einer Bodenwarmfront oder Okklusion und gelegentlich auch auf der Rückseite einer Ana-Kaltfront angetroffen werden.

Da die Niederschlagsentstehung in frontaler Bewölkung immer über die Eisphase erfolgt, muss notwendiger Weise oberhalb der unterkühlten Luftschicht ($t < 0\text{ °C}$) ein Gebiet mit Temperaturen von größer 0 °C vorhanden sein, in dem die festen Niederschlagspartikel auftauen.

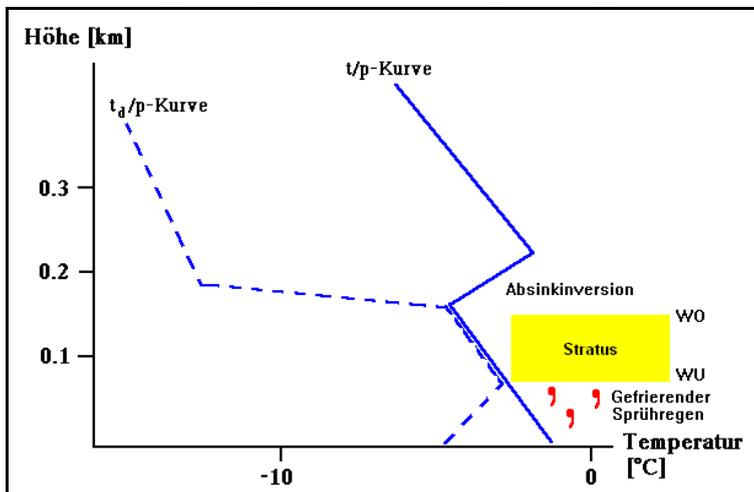
Entstehung von gefrierendem Regen und Glatteis (Abb. 17)



Voraussetzung für die Entstehung von gefrierenden Regen ist eine bodennahe, nicht zu dicke Kaltluftschicht - bei einer mächtigeren bilden sich sonst Eiskörner - mit einer Temperatur von unter 0 °C , in der die Regentropfen unterkühlt werden. Darüber muss eine Luftschicht mit Temperaturen über 0 °C vorhanden sein, in der die Eiskristalle und Schneeflocken, die in höheren Schichten bei Temperaturen von unter -10 °C entstanden sind, schmelzen.

Bei einer winterlichen Hochnebellage kann auch unterkühlter Sprühregen aus einem Stratus ausfallen.

Entstehung von gefrierendem Sprühregen und Glatteis (Abb. 18)



WO : Wolkenobergrenze

WU : Wolkenuntergrenze

Unterhalb einer winterlichen Absinkinversion bildet sich bei ausreichender Luftfeuchte häufig Stratus oder Nebel, aus dem bei ausreichender Mächtigkeit und Temperaturen von unter dem Gefrierpunkt und unterkühlter Sprühregen ausfallen kann.

6. Vereisungsvorhersage

6.1 Allgemeine Hinweise

Der Aufgabenbereich eines Flugwetterberaters umfasst unter anderem auch die Vorhersage der potentiellen Vereisungsgefahr, aber es liegt nicht in seiner Kompetenz, die Reaktion eines individuellen Luftfahrzeuges in bezug auf Vereisung zu bewerten. Seine Vorhersage sollte es den Piloten und Flugvorbereitern gestatten, dass von wolkenphysikalischen und aerodynamischen Faktoren abhängende Verhalten ihres Luftfahrzeuges unter den prognostizierten Vereisungsbedingungen zu beurteilen.

Bevor der Flugwetterberater mit der Vereisungsvorhersage beginnt, sollte die Prognose von Bewölkung, Wind, Temperatur und Turbulenz bereits abgeschlossen sein, da dann der physikalische Zustand der Wolken und ihre Niederschlagsformen bekannt sind.

Der vorherrschende, den Eisansatz an Luftfahrzeugen und damit auch überwiegend die Vereisungsvorhersage bestimmende Faktor ist der unterkühlte Wassergehalt einer Wolke, der, wie in den vorherigen Kapiteln erläutert wurde, abhängt von

- der Temperatur,
- dem Wasserdampfgehalt der Luft,
- der Stärke der Aufwindgeschwindigkeit der Luft und
- der vertikalen Mächtigkeit von Wolken.

a) Temperatur

- Die Untergrenze der Vereisungsschicht stellt die Höhe der 0 °C Isotherme dar. In Gebieten mit Starkniederschlag kann dieses Niveau absinken.
Auch durch die Orographie wird die Nullgradgrenze modifiziert. Auf der Luvseite eines Gebirges liegt sie tiefer und auf der Leeseite höher als in der ungestörten Umgebungsluft.
- Das Vereisungsrisiko ist bei Temperaturen von über -2 °C und unter -36 °C annähernd null, wird mit abnehmender Temperatur geringer und beträgt unter -22 °C weniger als 10 % (Air Weather Service 1964, 1980).
- Vereisung ist vorwiegend im Höhenintervall von 4000 - 8000 ft (1200 - 2400 m) über Grund anzutreffen, und zwar am häufigsten im Temperaturbereich von -4 bis -6 °C.

- Bei Temperaturen unter -15 °C ist starke Vereisung ungewöhnlich (Ausnahme nächster Punkt).
- Sind die Aufwinde in den Wolken kräftiger als im allgemeinen üblich ausgeprägt, dann ist die Vereisungsgefahr in allen Höhen größer als sonst üblich.
- Klareis ist an das Vorhandensein großer Wolkenröpfchen und relativ hohe Temperaturen gebunden. Raueis wird dagegen häufig bei Temperaturen unter -15 °C beobachtet.
- Flüge durch unterkühlten Niederschlag führen zu Klareisbildung, da die Tropfen groß und die Unterkühlung gering (0 bis -10 °C) ist. Hier kommt es zu einem Eisansatz auch an Flugzeugoberflächen, die sonst eisfrei bleiben.
- Die Vereisungsgefahr kann manchmal in Wolken, deren Obergrenzen die -15 °C -Isotherme nicht unterschreiten, hoch sein, weil im Mischwolkenbereich von -10 bis -15 °C die unterkühlten Wolkenröpfchen dominieren.
Dies ist immer dann der Fall, wenn keine höheren Wolken vorhanden sind, aus denen Eiskristalle ausfallen bzw. wenn dieser Vorgang in sich gerade entwickelnden vertikal mächtigen Wolken durch Aufwinde unterbunden wird.

b) Der Wasserdampfgehalt der Luft

- Sind cumuliforme Wolken durch Bodenkonvektion entstanden, so können synoptische Meldungen zur Festlegung des Wasserdampfgehaltes benutzt werden.
- Der Wasserdampfgehalt anderer labiler Wolken und der von Turbulenzwolken (z.B. von Ac cas und Sc, usw...) lässt sich in Höhe der Wolkenbasis aus repräsentativen TEMP bestimmen.
- Bei frontaler Bewölkung sollte das Ursprungsgebiet der Luftmasse ermittelt werden. Der Wasserdampfgehalt wird jedoch durch Kondensation von Wasserdampfes und niederschlagsbildende Vorgänge stark modifiziert. Im allgemeinen genügt aber die Kenntnis der annähernden geographischen Breite und des Charakters des Untergrundes (maritim oder kontinental) der Ursprungsregion.

c) Stärke der Aufwindgeschwindigkeit der Luft

- Die Topographie beeinflusst die Steiggeschwindigkeit der Luft wesentlich, so dass die an Gebirgen stattfindenden zusätzlichen Vertikalbewegungen große Veränderungen der Vereisungsbedingungen bewirken können.
Auch durch sich entwickelnde Wellen, die aufgrund der Untergrundverhältnisse und der Stabilitätsbedingungen entstehen, wird die Aufwärtsbewegung der Luft signifikant modifiziert.

- Eine instabile Schichtung führt zu kräftigen Aufwinden und zur Bildung von Quellwolken (Cb, Cu, Ac cas).
Bei erzwungener Hebung an Fronten, auf der Luvseite von Gebirgen und in Massenvergenzgebieten (Bodenkonvergenz, Höhendivergenz) entwickeln sich ebenfalls Quellwolken und bei latenter oder potentieller Labilität und sind sie in Schichtbewölkung eingelagert (embedded).
- Oft sind die Aufwindgeschwindigkeiten von frontalen, stratiformen Mischwolken zu gering, um den Verlust an Wasserdampf durch Sublimation im Temperaturbereich weit unter 0 °C aufrechtzuerhalten. Daher bestehen viele As- oder Ns-Wolken nahezu vollständig aus Eiskristallen, so dass die Vereisungsgefahr gering ist.
Treten dagegen bei besonders aktiven Fronten stärkere Aufwindgeschwindigkeiten als allgemein üblich auf, steigt die Vereisungsgefahr. Die Vereisungsschicht ist dann vertikal mächtiger und umfasst ein Gebiet von bis zu 150 km in der Umgebung der Bodenfront.
- Zahlreiche Sc-Schichten über See - besonders im Winter - sind aufgrund der hohen Wassertemperaturen und der damit labilen Schichtung konvektiven Ursprungs und entstehen durch Ausbreitung an einer Inversion. In diesen Wolken sind stärkere Aufwinde anzutreffen als in Stratocumulusbewölkung, die sich durch Turbulenz bildet, so dass die Vereisungsgefahr in maritimen Sc entsprechend größer ist.

d) Vertikale Mächtigkeit von Wolken

- Diese Größe bestimmt nicht nur den Betrag an Flüssigwasser, der bei der Hebung durch Kondensation freigesetzt wird, sondern auch die Temperatur im Wolkengipfel. Letztere dient dazu, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Eiskristallen abzuschätzen, die aus höheren in tiefere Wolkenregionen fallen können.
- Die Vorhersage der Schichtdicke von Wolken gehört in der Flugwetterberatung normalerweise zu den Routineaufgaben. Probleme gibt es dabei nur, wenn frontale Bewölkung auf eine Gebirgsbarriere trifft. Manchmal sind dabei die Wolken geschichtet, so dass die tiefen Wolken vom Gebirge aufgehalten werden können, während hohe Eiswolken ungehindert weiter vordringen. Damit werden die tieferen Wolken nicht mehr mit Eisteilchen aus höheren Schichten angereichert, so dass ihr Gehalt an unterkühltem Flüssigwasser hoch ist und die Vereisungsgefahr damit wesentlich anwächst.

6.2 Vorhersageverfahren

Vereisung während des Fluges entsteht überwiegend durch das Gefrieren von unterkühlten Wassertröpfchen auf der Flugzeugoberfläche und gefährdet hauptsächlich den Betrieb kleinerer Luftfahrzeuge, die in geringeren Höhen verkehren. Größere Maschinen, wie sie z.B. im Linienluftverkehr eingesetzt werden, befinden sich im Reiseflug meist oberhalb der Vereisungszonen und sind nur während der Steig- und Sinkflugphase von dieser Wettererscheinung betroffen..

Um Vereisungszonen zu erkennen und die Intensität und Art der Vereisung vorherzusagen zu können, muss der meteorologische Schlüsselparameter der Flugzeugvereisung, der Gehalt der Wolken an unterkühltem Flüssigwasser, bestimmt werden.

Mit den aus Messflügen gewonnenen Ergebnissen und den Erfahrungen von Piloten lässt sich der potentielle Anteil von unterkühltem Wasser aus repräsentativen TEMPs, aber auch aus Bodenbeobachtungen ableiten bzw. berechnen.

Die nachfolgenden Vorhersagemethoden der Flugzeugvereisung wurden aus dem Internet übernommen und stimmen weitgehend mit den Verfahren und Praktiken überein, die im DWD in die MAP und in das PC-MET-Programm integriert worden sind.

6.2.1 TEMP-Auswertung

6.2.1.1 -8 D-Methode

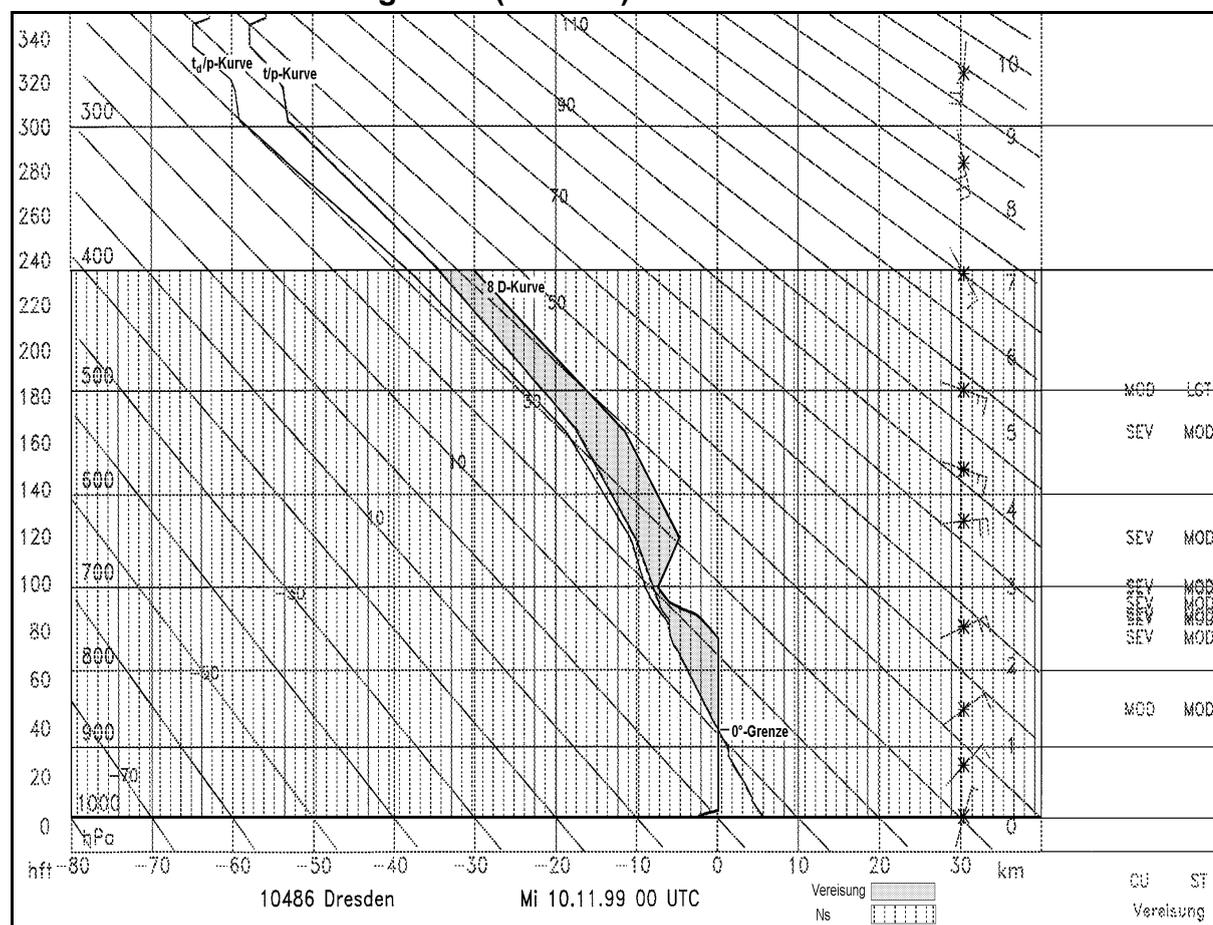
Die -8 D-Methode basiert auf der Erkenntnis, dass in Wolken bei hohen negativen Temperaturen (0 bis ca. -20 °C) und geringen Taupunktdifferenzen (0 - 2.5 K) Wasserdampfsättigung gegenüber der flüssigen Phase ($U = 100\%$) herrscht, so dass der Anteil an unterkühlten Wolkenröpfchen beträchtlich sein kann und die Vereisungsgefahr groß ist. Mit weiter abnehmenden Temperaturen wächst der Eisgehalt von Wolken, so dass der Flüssigwassergehalt und auch das Vereisungsrisiko sinkt und letztendlich in Eiswolken keine potentielle Vereisungsgefahr mehr besteht (s. Tab. 19). Um diese Verhältnisse im TEMP anschaulich darstellen zu können, wird in jedem Druckniveau der Zustandskurven die Taupunktdifferenz D mit dem Faktor -8 multipliziert und mit diesen Werten eine zweite Temperatur-/Druckkurve, die $-8 D$ -Kurve, in das thermodynamische Diagrammpapier eingetragen.

Verläuft diese $-8 D$ -Kurve rechts von der Temperatur/Druck-/Zustandskurve, besteht potentielle Vereisungsgefahr.

Temperatur t, Taupunktdifferenz D in Wolken und -8 D-Werte (Tab. 19)

		0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	t [°C]
D [K]	0	0	0	0	0	0	0	0	Die Tabelle 19 zeigt die mit der Beziehung $-8 D$ berechneten $-8 D$ -Werte für die Taupunktdifferenzen $D = 0$ bis 3.0 K. Im grau unterlegten Bereich sind diese Werte höher als die Temperatur, so dass potentielle Vereisungsgefahr besteht.
	0.5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	
	1.0	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	
	1.5	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	
	2.0	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	
	2.5	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	
	3.0	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	

-8 D - Kurve im Stüvediagramm (Abb. 19)



- Schraffiert gestrichelt : Schichtbewölkung ☞ Ns; Obergrenze bei FL 240 Quelle : [MAP]
- Dicke, ausgezogene Kurve : -8 D-Kurve; grau schraffiert ist Vereisungszone
- Dünne, ausgezogene Kurven : - rechte Kurve ☞ Temperatur/Druck-Kurve (t/p-Kurve)
- linke Kurve ☞ Tauspunkts/Druck-Kurve (t_d/p-Kurve)

Verläuft die -8 D-Kurve im TEMP rechts von der t/p-Kurve, ist mit Vereisung zu rechnen (grau schraffiert). Die Vereisungszone beginnt bei 4000 ft msl (0°-Grenze) und reicht bis zur Obergrenze des Nimbostratus. Am rechten Rand des TEMP wird die Intensität der Vereisung in Quell- (CU) und Schichtwolken (ST) über den Flüssigwassergehalt mit einer ähnlichen Beziehung wie in 2.1.1.8 (s. Form. 1 und 6.2.1.3) berechnet. Die Quellwolken werden dazu mit dem eindimensionalen Wolkenmodell der MAP bestimmt und die Schichtwolken mit einer Spread-Analyse (s. Tab. 20) ermittelt.

Die Tabelle 20 zeigt die Temperatur- und Taupunktdifferenzwerte, bei den Schichtwolken im TEMP angenommen werden können.

Schichtwolkenanalyse im TEMP (Tab. 20)

Temperatur	Taupunktdifferenz bei BKN	Taupunktdifferenz bei OVC
0 bis -5 °C	0 bis 2.5 °C	0 bis 0.5 °C
-5 bis -10 °C	0 bis 3.0 °C	0 bis 1.2 °C
-10 bis -15 °C	0 bis 3.5 °C	0 bis 1.6 °C
-15 bis -20 °C	0 bis 4.0 °C	0 bis 2.2 °C
-20 bis -25 °C	0 bis 4.3 °C	0 bis 2.5 °C
-25 bis -30 °C	0 bis 4.7 °C	0 bis 2.8 °C
-30 bis -60 °C	0 bis 5.0 °C	0 bis 3.5 °C

für Berechnung Vereisung in MAP

6.2.1.2 Temperatur und Taupunktdifferenz

Werden die Temperatur- t und Taupunktdifferenzwerte D der beiden Zustandskurven des TEMPs (t/p - und t_d/p -Kurve) zur Bestimmung der Vereisungsgefahr herangezogen, lassen sich Aussagen über mittlere Vereisungsbedingungen in Bezug auf Auftrittswahrscheinlichkeit, Intensität und Art des Eisansatzes treffen.

Keine Vereisung (Tab. 21)

t [°C]	D [°C]	Prognose und Trefferquote		nicht gültig bei – Kaltluftadvektion – in Cu/Cb – im Stau/über Bergen
0 bis -7	> 2	kein Eis	80 %	
-8 bis -15	> 3		90 %	
-16 bis -22	> 4			
< -22	alle Werte			

Quelle : [16]

Vereisungsintensität und Trefferquote (Tab. 22)

Quelle : [16]

t [°C]	D [°C]	Vereisungsintensität bei		
		keiner Advektion o. schwacher KLA	starker KLA	kräftiger Cu-Entwicklung
0 bis -7	≤ 2	Spuren, 75 %	leicht, 80 %	leicht, 90 %
-8 bis -15	≤ 3			

Art der Vereisung (Tab. 23)

Quelle : [16]

t [°C]	Wolken und Niederschlag	Eisart
0 bis -8	in Quellwolken und gefrierender Niederschlag	Klareis
-9 bis -15	in Quellwolken	Mischeis
0 bis -15	in stratiformer Bewölkung	Raueis
-15 bis -22	in Quellwolken und stratiformer Bewölkung	

Intensität und Art der Vereisung (Tab. 24)

Quelle : [16]

t [°C]	D [K]	Schichtung	Intensität/Art
0 bis -21	1 - 4	stabil	leicht, Raueis
0 bis -15	0 - 1		mäßig, Raueis
0 bis -15	1 - 4	labil	leicht, Mischeis
	0 - 1		mäßig, Mischeis

6.2.1.3 Berechnung des Flüssigwassergehaltes

Mit dem Flüssigwassergehalt LWC, das sich näherungsweise mit dem Mischungsverhältnis r , dem Luftdruck p und der Temperatur T in Flughöhe berechnen lässt (s. Form. 1, 2), kann die Intensität der Vereisung ebenfalls bestimmt werden (s. Tab. 25).

Flüssigwassergehalt LWC (Form. 2)

Quelle : [16]

$$LWC \approx \frac{1}{2.87} (r_B - r_h) \frac{p_h}{T_h}$$

- LWC : Flüssigwassergehalt [g m⁻³]
- 2.87 : individuelle Gaskonstante [hJ kg⁻¹ K⁻¹] trockener Luft
- r_B : Mischungsverhältnis [g kg⁻¹] an Wolkenbasis
- r_h : Mischungsverhältnis [g kg⁻¹] in Flughöhe
- p_h : Luftdruck [hPa] in Flughöhe
- T_h : Temperatur [K] in Flughöhe

Vereisungsintensität aus dem Flüssigwassergehalt LWC (Tab. 25)

Quelle : [16]

Wolke	Intensität S des Eisansatzes			
	Trace	leicht	mäßig	stark
cumuliform S = 1.63 LWC + 0.85	S < 1	1 < S < 2	2 < S < 3	S > 3
stratiform S = 2.2 LWC + 0.82				

6.2.2 Vereisungszonen in der Bodenwetterkarte

Auch die Bodenwetterkarte enthält Hinweise auf Vereisungszonen. Von Bedeutung sind hier Wolkenregionen ohne Niederschlag sowie Staubewölkung und frontale Hebungsgebiete, deren mittlere Vereisungsverhältnisse in Tabelle 26 wiedergegeben werden. Besonders vereisungsrelevant sind dabei Wolken von intensiven Fronten und kräftigen Staugebieten, über die jedoch keine Erfahrungswerte vorliegen. Kritisch kann es besonders dann werden, wenn die frontale Hebung noch durch orographisches Aufsteigen verstärkt wird.

Eisansatz in Wolken mit/ohne Niederschlag (Tab. 26)

Quelle : [16]

Wolken und Niederschlag		Eisansatz
frontale und orographische Hebung	nein	mit anhaltendem Niederschlag gering/kein Eis
		ohne Niederschlag leicht
	ja	mit Niederschlag/kein Niederschlag ist kein Indikator nicht spezifiziert
bis zu 500 km vor der Bodenwarmfront		leicht
bis zu 150 km hinter der Bodenkaltfront		mäßig
über einem intensiven, vertikal mächtigen Tief		mäßig
im gefrierenden Sprühregen (in/unter der Wolke)		mäßig, Klareis
im gefrierenden Regen (in/unter der Wolke)		stark, Klareis

6.2.3 TEMP und Bodenwetterkarte

Die gleichzeitige Verwendung von TEMP und Bodenwetterkarte ergeben nachstehende mittlere Vereisungsbedingungen im Bereich von Fronten und nicht orographischer Bewölkung.

Eisansatz an Bodenfronten (Tab. 27)

Quelle : [16]

Front	t [°C]	Wolken	Intensität/Art
Warmfront/500 km vor der Bodenfront	< -15	nicht definiert	leicht, Raueis
	0 bis -15	stratiform (stf)	
	0 bis -8	cumuliform (cuf)	leicht, Klareis
	-9 bis -15		leicht, Mischeis
Kaltfront/200 km hinter der Bodenfront	< -15	nicht definiert	leicht, Raueis
	0 bis -15	s stratiform (stf)	mäßig, Raueis
	0 bis -8	cumuliform (cuf)	mäßig, Klareis
	-9 bis -15		mäßig, Mischeis

Eisansatz in nicht orographischer Bewölkung (Tab. 28)

Quelle : [16]

	t [°C]	D [°C]	cuf/stf	Temperatur-Advektion	Vereisung	
verbreitet Niederschlag	0 bis -7	> 2	nicht spezifiziert	entfällt	Nein	
		≤ 2		WLA/keine Advektion	Trace	
				schwache KLA		
		-8 bis -15		< 3	starke KLA	Trace, Raueis
	entfällt				Nein	
	≤ 3			WLA/keine Advektion		
		leichte KLA				
	-16 bis -22	> 4		starke KLA	Trace, Raueis	
		≤ 4		entfällt	Nein	
	< -22	entfällt			Trace, Raueis	
kein Niederschlag	0 bis -7	> 2	nicht spezifiziert	entfällt	Nein	
		≤ 2		WLA		
				keine Advektion/leichte KLA	Trace, Raueis	
				stf	starke KLA	leicht, Raueis
				cuf		leicht, Klareis
	Cu con			leicht, Klareis		
	-8 bis -15	> 3	nicht spezifiziert	entfällt		Nein
		≤ 3		WLA		
				keine Advektion/leichte KLA	Trace, Raueis	
				stf	starke KLA	leicht, Raueis
				cuf	starke KLA	leicht, Klareis
	Cu con			leicht, Mischeis		
	-16 bis -22	> 4	entfällt		Nein	
		≤ 4	entfällt		Trace, Raueis	
	< 22	entfällt			Nein	

- D : Taupunktdifferenz
- t : Temperatur
- stf : stratiforme Bewölkung
- cuf : cumuliforme Bewölkung
- KLA : Kaltluftadvektion
- WLA : Warmluftadvektion

Literaturverzeichnis

- [1] BMV/LBA : Grundlagen der Luftfahrzeugtechnik in Theorie und Praxis, Bd. II, Flugwerk; Verlag TÜV Rheinland Pfalz GmbH, Köln 1980
- [2] Curry, A.L.; Liu.G. : Assessment of Aircraft Icing Potential Using Satellite Data; Journal of Applied Meteorology, Volume 31, June 1992
- [3] DWD : Leitfaden Nr. 1, Allgemeine Meteorologie; DWD, Offenbach/M 1987
- [4] England, J., Ulbricht, H. : Flugmeteorologie; VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1980
- [5] Federal Aviation Agency, Department of Commerce : Aviation weather for pilots and flight operations personnel; USA, Washington D.C. 1965
- [6] Geophysikalischer Beratungsdienst der Bundeswehr : Vereisung; Fachliche Mitteilungen der Bw, Reihe 1 Nr. 55
- [7] Hoffmann, H.-E. : Vereisungsgrade an Luftfahrzeugen : Definitionen und Ergebnisse von DFVLR-Versuchen;
- [8] Hoffmann, H.-E., Roth, R. : Cloudphysical Parameters in Dependence on Height Above Cloud Base in Different Clouds; Meteorology and Atmospheric Physics, Feb. 1989
- [9] Liljequist, G.H., Cehak, C. : Allgemeine Meteorologie; 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, 1984
- [10] Luftfahrtbundesamt : Vereisung; Flugsicherungsmitteilungen 27/81; Braunschweig, 01.08.1981
- [11] Lufthansa : Lernunterlage 'IFR-Flugmeteorologie'; Verkehrsfliegerschule Bremen, August 1983
- [12] Rummelmann, Uwe : Flugzeugenteisung; SW-Station Engineer & FlightcrewInfo, Deutsche Lufthansa
- [13] Telford, J. W. : An Example of the Behavior of an Aircraft with Accumulated Ice Latent Instability; Journal of Applied Meteorology, Volume 27, Oct. 1988
- [14] Tries, P., Fuchs, W. : Vorhersage der Vereisung - erneut aktuell; Promet 4, 1981
- [15] WMO-No. 364 : Compendium of meteorology, Volume II; WMO, Genf 1978
- [16] Internet : <http://www.janrix.com/personal/lcaltman/icing.htm>
- [17] Internet : <http://focus.msn.de/reisen/trends-service/fliegenimwinter?page=4>
- [18] Internet : <http://www.gtaa.com/Images/TerminalNewGallery/images/Deicing.jpg>