

Kalte Wolken

- In mittleren Breiten liegen die Temperaturen in den Wolken häufig unter 0°C .
- In diesen sogenannten **kalten Wolken** gibt es auch Tropfen aus flüssigem Wasser (**Unterkühlte Tropfen**).
- Bei Temperaturen unter -10°C enthält eine kalte Wolke sowohl Eiskristalle als auch unterkühlte Wassertropfen (**Mischwolke**).
- Wolken, die ausschließlich aus Eiskristallen bestehen (**Eiswolken**), bilden sich meist erst unter -35°C , d.h. in Höhen oberhalb 6000 m bis 7000 m.
- Ich werde nun das Wachstum der Eiskristalle und die Niederschlagsbildung in kalten Wolken erläutern.

- Ein unterkühlter Wassertropfen befindet sich in einem instabilen Gleichgewicht.
- Der Tropfen gefriert jedoch erst, wenn im Tropfen ausreichend viele Wassermoleküle so zusammenkommen, daß ein genügend großer Eiskeim entsteht.
- Die Situation ist ähnlich wie bei der Bildung eines Wassertropfens aus der Dampfphase.
- Wenn der Tropfen eine bestimmte Größe überschreitet, wächst er von allein weiter, weil dabei die Gesamtenergie des Systems Wasser + Eis abnimmt.
- Dagegen hat das Wachstum von Eiskeimen, die kleiner als die kritische Größe sind, eine Zunahme der Gesamtenergie zur Folge.
- Diese Eiskeime brechen deshalb wieder auseinander.

- Wenn ein Wassertropfen keine Fremdkörper enthält, können sich Eiskerne nur **durch zufälliges Ordnen** mehrerer Wassermoleküle bilden.
- Die Anzahl und Größe der Eiskerne, die auf diese Weise entstehen, nimmt bei tieferen Temperaturen zu.
- Ab einer bestimmten Temperatur (die vom Tropfenvolumen abhängt) setzt die Eisbildung mit großer Wahrscheinlichkeit ein.
- Tropfen aus reinem Wasser mit einem Radius zwischen 20 μm und 60 μm gefrieren bei ungefähr -36°C , Tropfen mit einem Radius von einigen Mikrometern bei ungefähr -39°C .
- Diese Art der Eiskristallbildung spielt daher nur in sehr hohen Wolken eine Rolle.

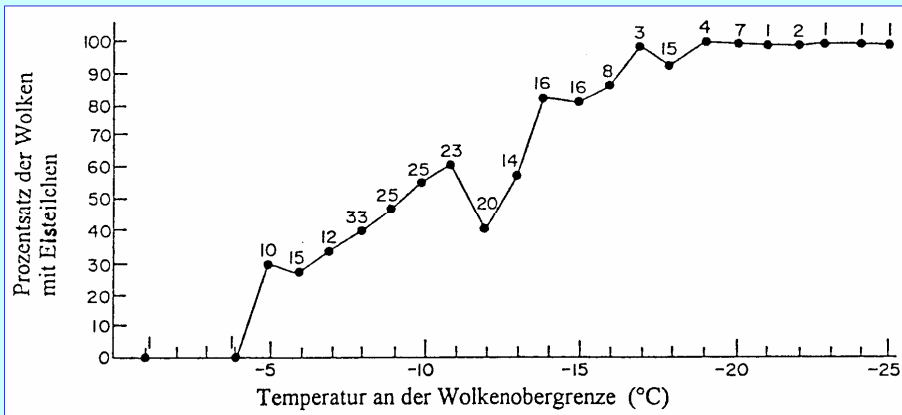
- Wenn Fremdkörper in den Wassertropfen vorhanden sind, erfolgt das Gefrieren der Tropfen bei geringeren Unterkühlungen.
- Denn auf der Oberfläche dieser sogenannten **Gefrierkerne** können sich Wassermoleküle so anordnen, daß eine eisähnliche Struktur entsteht, deren Größe für ein weiteres Wachstum ausreicht.
- Als Gefrierkerne eignen sich Teilchen, die einen ähnlichen Aufbau wie die Eiskristalle haben (z. B. Mineralkristalle).
- Außerdem sollten die Teilchen wasserunlöslich sein.
- (Verschiedene Methoden zur Messung der Konzentration von Gefrierkernen werden von **Wallace und Hobbs** auf Seite 184 beschrieben.)

- Abgesehen von den Eiskristallen selbst zählen Silberjodidkristalle zu den besten bisher bekannten Gefrierkernen. Sie werden ab -5°C wirksam.
- Je geringer die Unterkühlung ist, desto größer müssen die Gefrierkerne sein, um die kritische Größe zu überschreiten.
- Weil die Anzahl der Gefrierkerne mit wachsendem Kernradius abnimmt, werden zwischen 0°C und -10°C nur wenige Gefrierkerne aktiviert.
- In diesem Temperaturbereich gefrieren daher nur wenige Wolkentropfen.

- Mit tieferen Temperaturen nimmt die Zahl der aktivierbaren Kerne stetig zu.
- Bei -35°C sind meist alle Gefrierkerne wirksam geworden.
- Die Anzahl der Gefrierkerne (ca. 1 pro cm^3) ist allgemein wesentlich kleiner als die der Kondensationskerne (>100 pro cm^3).
- Bis jetzt wurde angenommen, daß die Gefrierkerne im Tropfen enthalten sind.
- Wolkentropfen können aber auch gefrieren, wenn sie in Berührung mit einem Gefrierkern kommen.
- Laborversuche ergeben, daß die Gefrierkerne in diesem Fall bereits bei um einige Grad höheren Temperaturen wirken können.

- Zur Bildung von Eiskristallen in der Atmosphäre gibt es noch einen weiteren Prozeß, denn an bestimmten Kernen geht der Wasserdampf direkt in die Kristallform über.
- Diese sogenannten **Sublimationskerne** müssen einen Radius von mehr als $0,1 \mu\text{m}$ besitzen und wasserunlöslich sein.
- Außerdem sind sehr tiefe Temperaturen und große Eisübersättigungen erforderlich.
- Wenn die Luft gegenüber Wasser und Eis gesättigt ist, kann ein geeignetes Teilchen entweder als Gefrierkern oder als Sublimationskern dienen.
- Im ersten Fall kondensiert der Wasserdampf auf der Partikeloberfläche und gefriert danach, während im zweiten Fall die flüssige Phase nicht durchlaufen wird.

- Die Temperatur, bei der die Eisbildung in einer Wolke einsetzt, hängt von Eigenschaften der Gefrier- bzw. Sublimationskerne und von dem ausgelösten Kristallisationsmechanismus ab.
- Man kann daher nur die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der bei einer bestimmten Temperatur Eiskristalle in den Wolken vorkommen.
- **Das nächste Bild** zeigt die Ergebnisse von Beobachtungen in verschiedenen Wolken.

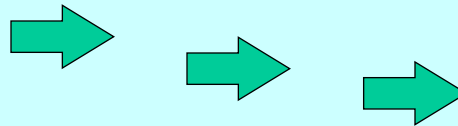


Die Wahrscheinlichkeit (in %) für Eisteilchen in Wolken als Funktion der Temperatur an der Wolkenobergrenze.

Gemessen wurde in 30 orographischen Wolken und 228 Cumulus-Wolken. Die Zahl über jedem Punkt gibt an, wieviele Messungen bei der jeweiligen Temperatur zur Verfügung standen.

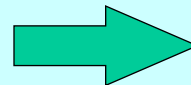
- Bei Temperaturen zwischen 0°C und -4°C an der Wolkenobergrenze bestehen die Wolken **ausschließlich aus unterkühlten Tropfen.**
- In solchen Wolken ist die **Vereisungsgefahr für Flugzeuge** am größten, da die Wolkentropfen beim Aufprall auf die Flugzeugoberfläche sofort festfrieren.
- Wenn die Temperatur an der Wolkenobergrenze -10°C beträgt, kann man mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% Eiskristalle in den Wolken erwarten.
- Unter -20°C steigt die Wahrscheinlichkeit auf 95% an.

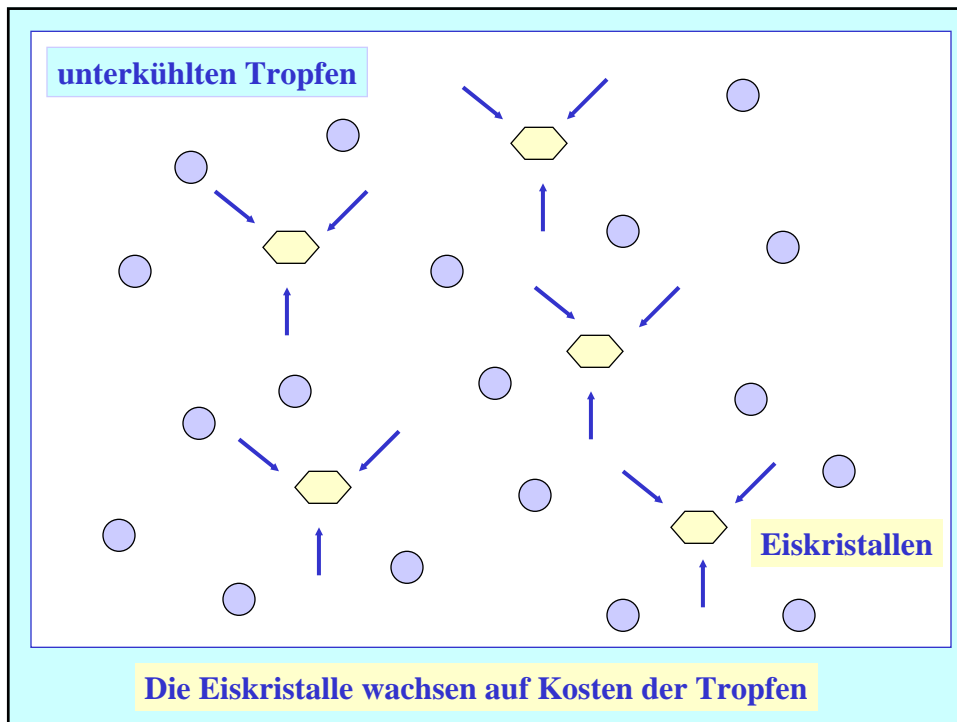
- Die Messung der Konzentration von Eiskristallen in einer Wolke ist sehr schwierig.
- Einige damit verbundene Probleme und Meßtechniken diskutieren **Wallace und Hobbs auf Seite 186 ff.**
- Für das Wachstum von Eiskristallen bis zur Größe von Niederschlagsteilchen gibt es verschiedene Möglichkeiten:
 - Wachstum durch Sublimation
 - Wachstum durch Koagulation
 - Wachstum durch Adhäsion



(a) Wachstum durch Sublimation:

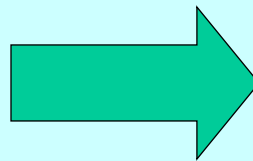
- In **Mischwolken**, die überwiegend aus unterkühlten Tropfen bestehen, ist die Luft **gegenüber Flüssigwasser gesättigt** und **gleichzeitig bezüglich Eis stark übersättigt**.
- Bei -10°C beträgt diese Übersättigung 10% und bei -20°C sogar 21%.
- Dagegen überschreitet die Übersättigung gegenüber Flüssigwasser in der Wolkenluft selten 1%.
- Deshalb strömt ständig Wasserdampf aus der Umgebung der Tropfen zu den Eiskristallen und gefriert hier an, d.h. die Eiskristalle wachsen auf Kosten der Tropfen.

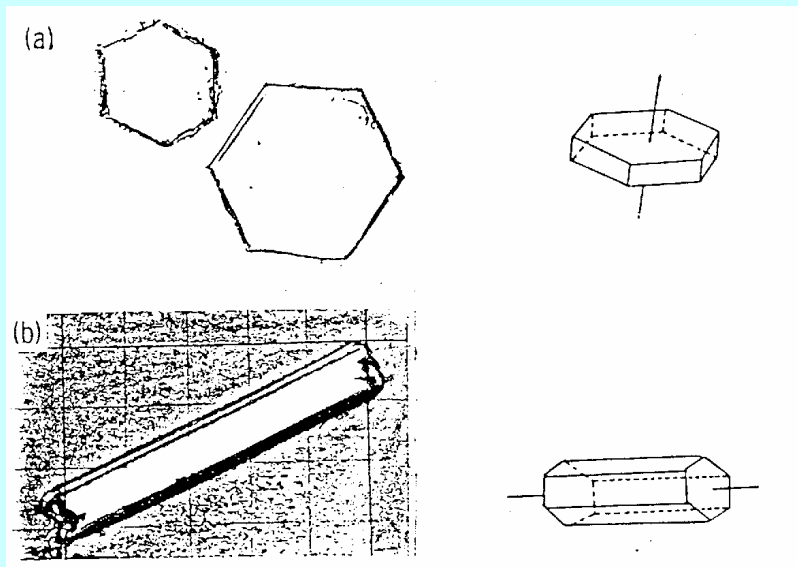




Die Eiskristalle

- **Die Eiskristalle, die aus der Dampfphase durch Sublimation wachsen, können eine vielfältige Form und Größe annehmen.**
- **Die einfachsten Kristalle bestehen aus ebenen hexagonalen Platten oder hexagonalen Prismen.**




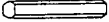




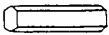


Die einfachsten atmosphärischen Eiskristalle

Laborversuche mit Eiskristallenwachstum

- Laborversuche, in denen das Wachstum von Eiskristallen durch Sublimation unter kontrollierten Bedingungen untersucht wurde, und Beobachtungen in realen Wolken zeigen, daß die Eiskristallart von der beim Kristallwachstum herrschenden Temperatur bestimmt wird.
- In der Natur sind die Kristalle auf ihrem Weg durch eine Wolke ständig wechselnden Temperaturen und Übersättigungen ausgesetzt.
- Daher können ziemlich komplexe Formen entstehen, auch wenn die Kristalle ausschließlich durch Sublimation wachsen.

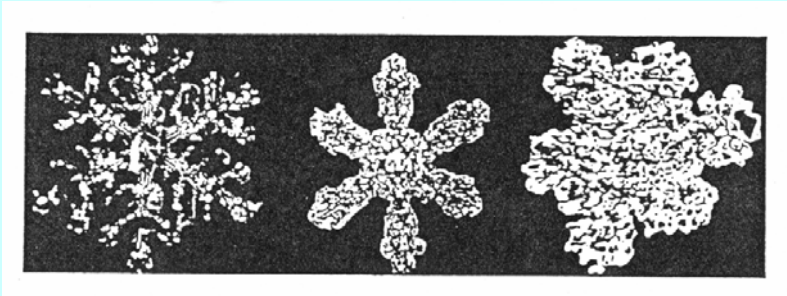
Die Eiskristallarten in Abhängigkeit von der Bildungstemperatur

Temperaturbereich (°C)	Grundform	Eiskristallart bei geringer Übersättigung gegenüber Wasser	
0 bis -4	Platten	Dünne hexagonale Platten	
-4 bis -10	Prismen	Nadeln -4 °C bis -10 °C	
		Hohlprismen -4 °C bis -10 °C	
-10 bis -22	Platten	Sektorplatten -10 °C bis -12 °C	
		Dendriten -12 °C bis -16 °C	
		Sektorplatten -16 °C bis -22 °C	
-22 bis -50	Prismen	Prismen	

(b) Wachstum durch Koagulation:

- Wenn Eiskristalle durch eine Mischwolke fallen, kollidieren sie mit unterkühlten Wolkentropfen.
- Durch das Anfrieren der Tropfen (man nennt diesen Vorgang, wie das Zusammentreffen und Zusammenbleiben von Aerosolteilchen, **Koagulation**) wachsen die Eiskristalle und ändern dabei ihre Gestalt so sehr, daß man die ursprüngliche Kristallform oft nicht mehr erkennen kann.
- Häufig bilden sich poröse Kugeln mit einem Durchmesser von einigen Millimetern (**Graupel**).
- In konvektiven Wolken mit kräftigen Aufwinden und hohem Flüssigwassergehalt kann das Wachstum durch Koagulation extreme Ausmaße annehmen.
- Es entsteht **Hagel** mit einem Durchmesser von bis zu 10 cm.

Zunehmende Vergraupelung von Schneesternen



(c) Wachstum durch Adhäsion:

- Die Eiskristalle können sich auch vergrößern, wenn sie im freien Fall mit anderen Kristallen zusammenstoßen und sich dabei verhaken oder aneinander kleben bleiben (**Adhäsion**).
- Voraussetzung ist, daß die Teilchen unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten haben.
- Die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen steigt an, sobald sich auf den Kristallen einige Wolkentropfen angelagert haben, denn dann erhöht sich die Fallgeschwindigkeit der Teilchen
- Graupelkorn mit 1 mm Durchmesser haben eine Fallgeschwindigkeit von 1 ms^{-1} , Graupelkorn mit 4 mm Durchmesser eine Fallgeschwindigkeit von $2,5 \text{ ms}^{-1}$.

- Ob die Teilchen nach einer Kollision zusammenbleiben oder nicht, hängt hauptsächlich von der Eiskristallart und von der Temperatur ab.
- Kompliziert aufgebaute Kristalle, wie z. B. dendritische Kristalle (Schneesterne mit vielen Verzweigungen), verhaken sich bei einer Kollision, während einfache Platten aneinander abprallen.
- Bei Temperaturen über -5°C werden die Eisoberflächen **klebrig**, weshalb in diesem Temperaturbereich die Adhäsion von Eisteilchen am häufigsten vorkommt.

Niederschlagsbildung in kalten Wolken

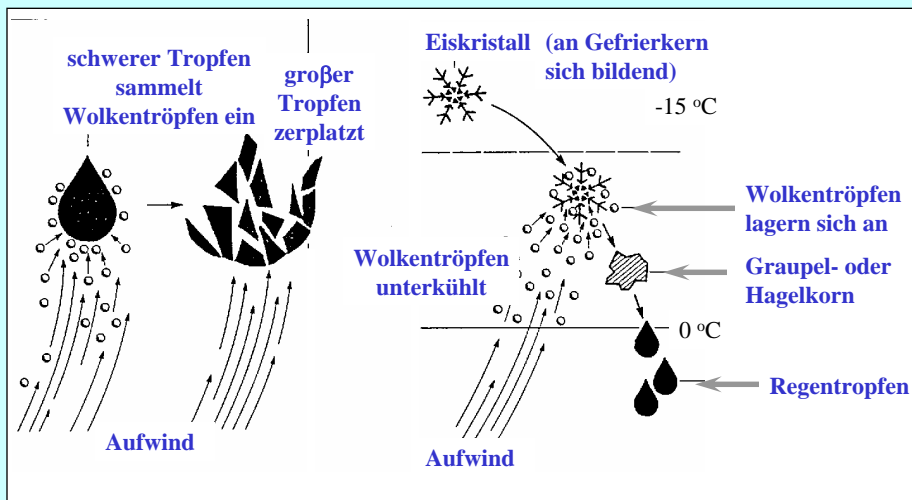
- Berechnungen ergeben, daß eine hexagonale Platte, wenn sie durch Sublimation in gegenüber Wasser gesättigter Luft bei -5°C anwächst, in 30 Min. eine Masse von höchstens $7\ \mu\text{g}$ (d.h. einen Durchmesser von ca. 1 mm) erreichen kann.
- Wenn die Aufwindgeschwindigkeit der Luft kleiner als die Fallgeschwindigkeit des Eiskristalls (ca. $0,3\ \text{ms}^{-1}$) ist, kann sich der Eiskristall nicht mehr in der Wolke halten und fällt als kleiner Nieseltropfen mit einem Radius von ca. $130\ \mu\text{m}$ zu Boden, vorausgesetzt der Tropfen verdunstet nicht zwischen Wolkenbasis und Erdoberfläche.
- Ausschließlich durch Sublimation vergrößern sich die Eiskristalle demnach so langsam, daß keine großen Regentropfen entstehen können.

- Anders als beim Wachstum durch Sublimation **wachsen die Teilchen durch Koagulation und Adhäsion mit zunehmendem Radius immer schneller.**
- Die gleiche hexagonale Platte wie oben kann sich daher innerhalb von 10 Min. zu einem kugelförmigen Graupelteilchen mit einem Durchmesser von 1 mm entwickeln.
- Ein Graupelkorn dieser Größe hat eine Dichte von 100 kg m^{-3} eine Fallgeschwindigkeit von 1 ms^{-1} und würde zu einem Tropfen mit einem Radius von ca. $230 \text{ }\mu\text{m}$ schmelzen.

Bergeron-Findeisen-Prozeß

- Der Durchmesser einer Schneeflocke kann sich durch Verhaken von mehreren Eiskristallen in 30 Min. von 1 mm auf 1 cm erhöhen, falls der Eisgehalt der Wolke 1 gm^{-3} beträgt.
- Eine solche Schneeflocke hat eine Masse von ca. 3 mg und eine Fallgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} .
- Wenn der Schneekristall schmilzt, entsteht ein Tropfen mit einem Radius von ca. 1 mm.
- Aus diesen Angaben folgt, daß Eiskristalle in Mischwolken, zuerst durch Sublimation von Wasserdampf und dann durch Koagulation und Adhäsion, innerhalb einer realistischen Zeitspanne (ca. 40 Min.) die Größe von Niederschlagsteilchen erreichen können.
- Diese Art der Niederschlagsbildung bezeichnet man als **Bergeron-Findeisen-Prozeß.**

Die Niederschlagsbildung in warmen und kalten Wolken im Vergleich

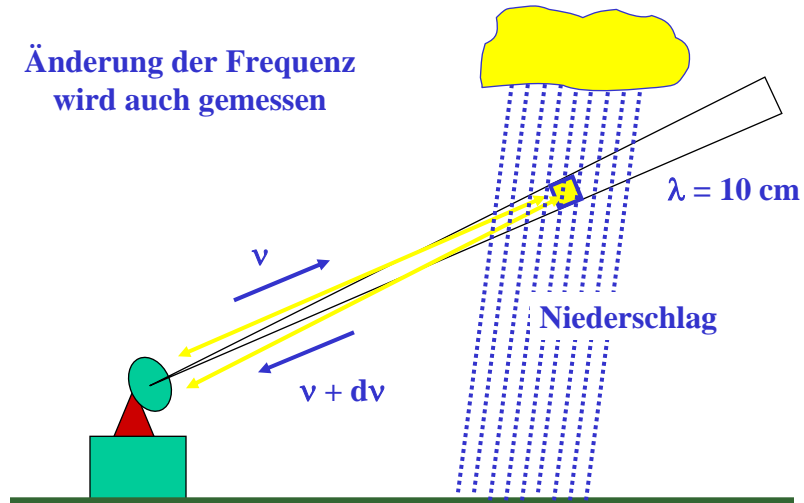


Radarmessungen

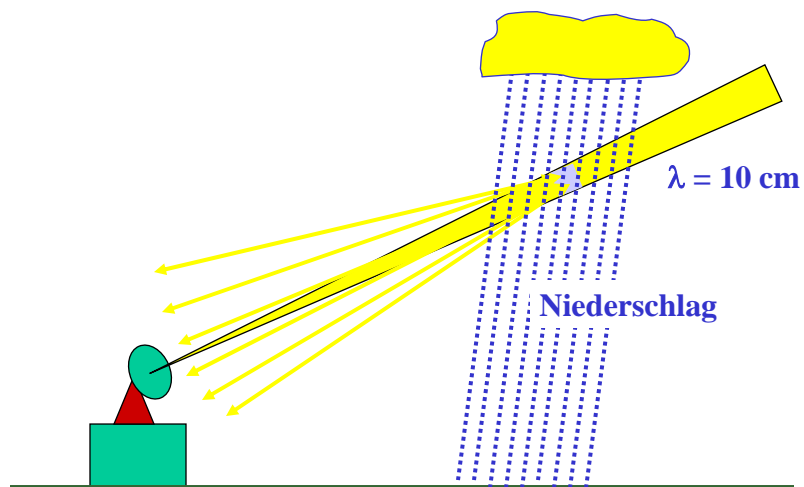
- Radarmessungen bestätigen die Bedeutung der Eisphase bei der Entstehung von Niederschlag in kalten Wolken.
- Wenn der Radarstrahl eine vertikale Ebene überstreicht, werden die Impulse besonders stark aus der Höhe reflektiert, in der die Eisteilchen zu schmelzen beginnen.
- Die hohe Radarreflektivität schmelzender Eisteilchen wird durch den dünnen Wasserfilm verursacht, der die Oberfläche überzieht, sobald die Niederschlagsteilchen den warmen Teil der Wolke erreichen.
- Mit einem Doppler-Radar läßt sich nachweisen, daß sich die Fallgeschwindigkeit der Niederschlagsteilchen beim Übergang von Eiskristallen zu Regentropfen erhöht.

Wetter Radar

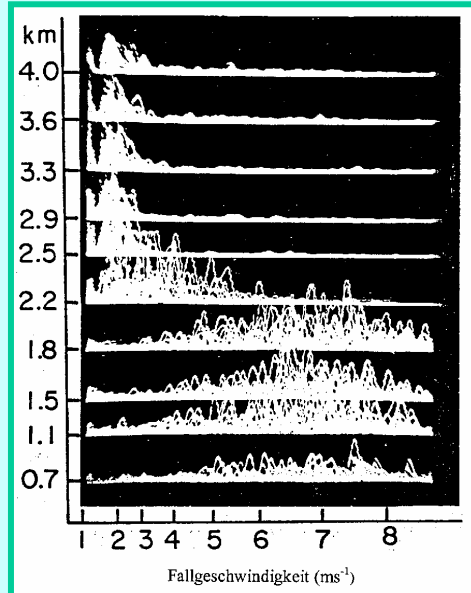
Änderung der Frequenz
wird auch gemessen



Doppler Radar



Die Spektren der Doppler-Fallgeschwindigkeiten für Niederschlagsteilchen in zehn verschiedenen Höhen.



Ende