

Wolkenschnüffler



Allgemeine Meteorologie - Wolken- und Niederschlagskunde -



Wolken und Nebel

Michael F. H. Krutina

Stand: Sept. 2005

D:\Webseite\Deckblätter\Wolken.wpg

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Wolkenklassifikation	1
1.1 Wolkenstockwerke	1
1.2 Wolkenmerkmale	3
1.2.1 Stratiforme Wolken	3
1.2.2 Cumuliforme Wolken	4
1.2.3 Wasserwolken	4
1.2.4 Mischwolken	6
1.2.5 Eiswolken	8
1.3 Internationale Wolkenklassifikation	10
1.3.1 Wolkengattungen	10
1.3.2 Wolkenarten	12
1.3.3 Wolkenunterarten	13
1.3.4 Sonderformen und Begleitwolken	14
1.3.5 Mutterwolken	14
1.3.6 Helligkeit und Farbe von Wolken	15
1.3.7 Beschreibung der Wolken im Wolkenatlas	16
2. Wolkenbildung und -auflösung	29
2.1 Wolkenbildungsprozesse	29
2.1.1 Wasserdampfzunahme durch Verdunstung	30
2.1.2 Abkühlung der Luft unter den Taupunkt bzw. Reifpunkt	30
2.2 Entstehung einiger Wolkengattungen	42
2.2.1 Cumuliforme Wolken	42
2.2.2 Stratiforme Wolken	55
2.2.3 Cirriforme Wolken	65
2.3 Künstliche und Wolken in der höheren Stratosphäre	67
2.3.1 Künstliche Wolken	67
2.3.2 Wolken in der mittleren und hohen Atmosphäre	69
2.4 Wolkenauflösungsprozesse	72
2.4.1 Sublimation in Mischwolken	72
2.4.2 Erwärmung über von Wolkenluft den Tau- bzw. Reifpunkt	73
2.4.3 Mischung von Wolkenluft mit feuchter Umgebungsluft	74
2.4.4 Diagramm der Wolkenmechanismen	75
3. Nebelbildung und Auflösung	76
3.1 Nebelbildungsprozesse	76
3.1.1 Abkühlungsnebel	76
3.1.2 Verdunstungsnebel	80
3.1.3 Mischungsnebel	82
3.2 Nebelauflösung	82
3.2.1 Nebelauflösung in der Natur	82
3.2.2 Künstliche Nebelauflösung an Flughäfen	84
4. Anhang: Wolken- und Nebelbilder	85
Literaturverzeichnis	89

1. Wolkenklassifikation

1.1 Wolkenstockwerke

Eine Wolke ist eine sichtbare, in der Luft schwebende Anhäufung von atmosphärischen Kondensations- und Sublimationsprodukten des Wasserdampfes, (Wassertröpfchen und/oder Eisteilchen), die den Erdboden im Gegensatz zum Nebel nicht berührt.

Wahrnehmbar werden Wolkenpartikel, wenn ihr Durchmesser die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes (360 - 780 nm) überschreitet und sie schweben, solange ihr Gewicht nicht zu groß ist und sie von den Aufwärtsbewegungen der Luft getragen werden.

Der Radius der sichtbaren und schwebenden Wolkenelemente liegt etwa im Bereich von $r = 10^{-6}$ bis $r \approx 10^{-4}$ m. Größere Teilchen fallen früher oder später als Fallstreifen (virga) aus oder sie erreichen den Erdboden als Niederschlag.

Das Aussehen der Wolken wird bestimmt von der Art, Größe und räumlichen Verteilung der Wolkenelemente in der Troposphäre, von Eigenarten in ihrer Gestalt und der Lichtdurchlässigkeit, von der Anordnung der Wolkenteile sowie von der Intensität (Helligkeit) und Farbe des auf die Wolke fallenden Lichtes bzw. der Stellung des Beobachters und der Lichtquelle zur Wolke. Ein aufmerksamer und erfahrener Wolkenbeobachter ist deshalb in der Lage, aus dem Erscheinungsbild der Wolke den Aggregatzustand ihrer Elemente abzuleiten, aus dem sich eine erste physikalische Einteilung der Wolken ergibt (s. Tab. 1).

Physikalische Einteilung der Wolken (Tab. 1)

Physikalische Einteilung	Wolkenelemente	Temperaturbereich	Gattungen
Wasserwolken	Nur Wassertröpfchen	$> -10\text{ °C}$	Cu, Sc, St, Ac
Mischwolken	Wassertröpfchen und Eisteilchen	$< -10\text{ °C bis } \geq -35\text{ °C}$	Cb, Ns, As
Eiswolken	Nur Eisteilchen	$< -35\text{ °C}$	Ci, Cc, Cs

Den Temperaturwerten in Tabelle 1 entsprechen in unseren Breiten im Mittel die in der Tabelle 2 aufgeführten, auf ganze Kilometer abgerundete troposphärische Höhen (s. Tab. 2). Aus diesen Werten lassen sich Rückschlüsse auf die drei Wolkenstockwerke der gemäßigten Zone ziehen. Wird zusätzlich noch die geographische Breite, die Jahreszeit, die Luftmasse und die vom Untergrund ausgelösten thermodynamischen Wolkenbildungsprozesse in Betracht gezogen, so resultiert daraus die Einteilung der Troposphäre gemäß Tabelle 3.

Mittlere Höhen und Temperaturen in den gemäßigten Breiten (Tab. 2)

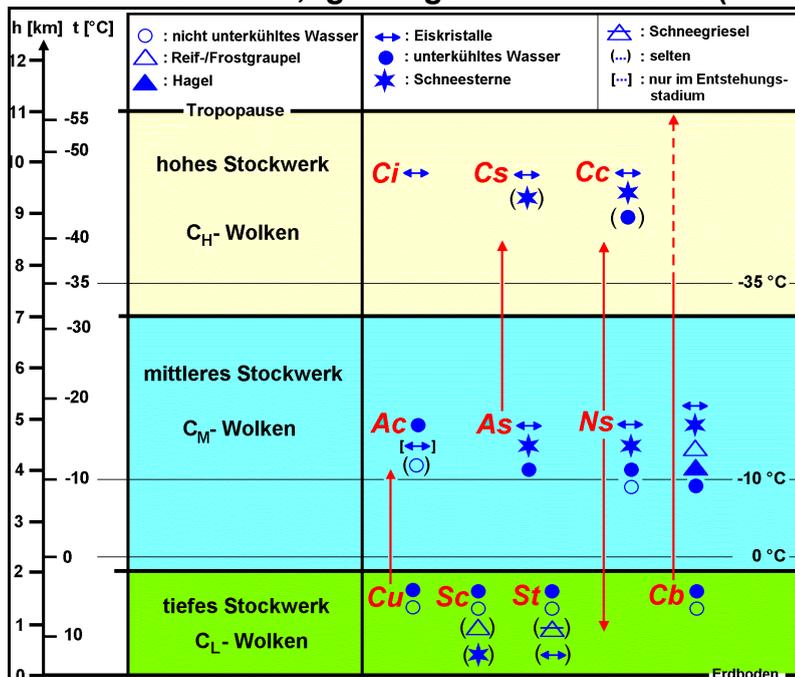
Mittlere Temperaturen	Mittlere Höhen
0 °C	2 km
-10 °C	4 km
-35 °C	7 km

Wolkenstockwerke der Erde (Tab. 3)

Wolkenstockwerk		Höhe [km]			Wolkengattung
		Polare Zone	Gemäßigte Zone	Tropische Zone	
hoch	C _H -Wolken	3 - 8	5 - 13	6 - 18	Ci, Cs, Cc
mittel	C _M -Wolken	2 - 4	2 - 7	2 - 8	Ac, As, Ns
tief	C _L -Wolken	0 - 2	0 - 2	0 - 2	St, Sc, Cu, Cb

Wolkenstockwerke, -gattungen und -elemente (Abb. 1)

Quelle :[4]



Elemente

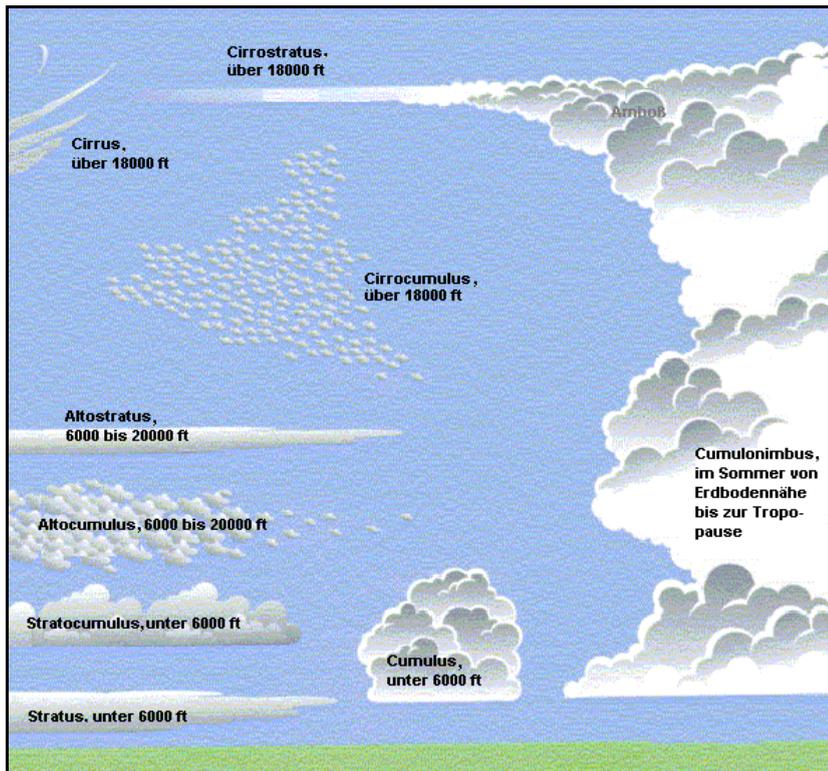
Der Begriff "Wolkenelemente" umfasst hier nicht nur die schwebenden Wolkenpartikel, sondern auch die sich in der Wolken bildenden größeren Niederschlags- teilchen.

Für die Wolkenstockwerke und ihre -gattungen gelten :

- Die Untergrenze der Stockwerke ist der Erdboden und das tiefe Stockwerk besteht in allen drei Zonen aus der planetarischen Grundschicht der Troposphäre, in der die thermischen und dynamischen Vorgänge hauptsächlich vom Erdboden beeinflusst werden;
- die Obergrenze der Stockwerke stellt die Tropopause dar, die in polaren Breiten bei 8 - 10 und in tropischen Gegenden bei 16 - 18 km Höhe liegt;
- hohe Wolken der Gattung Cirrus können in sehr kalten polaren Gegenden unter Umständen bis zum Erdboden reichen, wobei man die in der Sonne glitzernden Eiskristalle direkt wahrnimmt, jedoch nicht den Eindruck einer Wolke hat;

- Altostratus reicht mit seiner Obergrenze oft in das hohe Stockwerk hinein;
- Nimbostratus, der seine Untergrenze im tiefen Stockwerk hat, kann sich bis in das obere Stockwerk erstrecken;
- Cumuluswolken können vom tiefen bis in das mittlere Stockwerk hinaufreichen und ein Cb wird im Sommer häufig nur von der Tropopause begrenzt. Die Untergrenzen von Cu und Cb befinden sich im Sommer manchmal auch im mittleren Stockwerk.

Vertikale Ausdehnung einiger troposphärischer Wolkengattungen (Abb. 2)



Die Grafik zeigt als schematische Abbildung das Erscheinungsbild einiger troposphärischer Wolkengattungen mit Angaben ihrer Untergrenze in Fuß. Altostratus als niederschlagsbildende Wolke kann aber wesentlich mächtiger sein und der Cumulonimbus wird hier als sommerliche Gewitterwolke dargestellt (s. auch Abb. 1).

1.2 Wolkenmerkmale

1.2.1 Stratiforme Wolken

Stratiforme Wolken bilden sich in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Sie entstehen durch großflächige Abkühlungsprozesse, die meist durch adiabatische Expansion, aber in einigen Fällen auch durch den Kontakt mit einem kalten Untergrund hervorgerufen werden.

Typisch für stratiforme Wolken während ihrer aktiven Entwicklung sind die

- große horizontale Mächtigkeit im Vergleich zu ihrer vertikalen Schichtdicke,
- häufig diffusen Umrissen und
- schwachen Vertikalbewegungen.

Stratiforme Wolken lassen sich in vier Gruppen einteilen:

- Stratus,
- dünne stratiforme Wolken der Art stratiformis (Sc, Ac, Cc [pe, tr, la, un]),
- dünne stratiforme Wolken der Art lenticularis (Sc, Ac, Cc) und
- dicke stratiforme Wolken (Ns, As, Sc str op, Ac str op) und Schichtwolken-systeme in der Form von Cs - As - Ns, oder Ac - AcAs - Ns.

1.2.2 Cumuliforme Wolken

Cumuliforme Wolken entstehen in troposphärischen labilen Luftschichten durch Konvektion und zeigen beim aktiven Wachstum meist folgende Merkmale:

- Ein haufenförmiges Aussehen mit anschwellenden, kuppelartigen Obergrenzen, die mit den aufsteigenden Thermikblasen übereinstimmen,
- scharfe Wolkenränder und meist mehr oder weniger glatte Untergrenzen und
- heftige Vertikalbewegungen.

Die bekanntesten cumuliformen Wolken sind die Gattungen Cu und Cb, aber Quellformen können auch manchmal im mittleren (Ac flo, Ac cas) und hohen Stockwerk auftreten. Sie zeigen dann ein anderes Aussehen.

1.2.3 Wasserwolken

Im allgemeinen sind Wolken bis etwa -10 °C reine Wasserwolken. Sie weisen die höchste Anzahl von Wolken-elementen auf - mehr als 100 pro cm^3 -, weil bei hohen Temperaturen mehr Wasserdampf zur Kondensation zur Verfügung steht als bei tiefen.

Da die Anzahl der Wolkenelemente außerdem mit der Schnelligkeit der Wolkenbildung zunimmt, ist sie in Wolken mit starken Aufwindgeschwindigkeiten größer als in Wolken mit geringen und kann besonders in Wolken rascher Bildungsprozesse hoch sein und bis zu 600 Teilchen pro cm^3 betragen.

Zu den Wasserwolken mit starken Vertikalbewegungen in der Größenordnung von Metern pro Sekunde zählen die meisten Konvektionswolken. Schichtwolken dagegen weisen normalerweise nur schwach ausgeprägte Hebungsvorgänge im Bereich von Zentimetern pro Sekunde auf.

Für die Gattungen der Wasserwolken gilt :

- Wasserwolken sind St, Sc, Cu und Ac;
- Ac enthält im Bildungsstadium häufig eine geringe Anzahl von gefrorenen Tröpfchen, die aufgrund der Übersättigung gegenüber Eis anwachsen und als virga ausfallen, so dass eine reine unterkühlte Wasserwolke zurückbleibt;
- im Winter bei tiefen Temperaturen können die normalerweise als Wasserwolken zu beobachtenden Gattungen St und Sc auch als Mischwolken in Erscheinung treten;
- nicht nur aus Mischwolken, sondern auch aus Wasserwolken fällt Niederschlag.

Typische Merkmale von Wasserwolken (Tab. 4)

Gattungen	St, Sc, Cu, Ac Bemerkungen : dichte Wasserwolken ▶ Cu, Sc, (Ac); Ac ist im Bildungsstadium gelegentlich eine Mischwolke, dann virga; bei $t < -10\text{ °C}$ sind auch St und Sc Mischwolken und verursachen Niederschlägen (s. Tab. 7)
mittlerer Temperaturbereich	über -10 °C
mittlere Höhen in den gemäßigten Breiten	0 bis 4 km, ab 2 km unterkühlt
Wolken- elemente	Art Wassertröpfchen, $r = 1 - 50\ \mu\text{m}$
Anzahl	> 100 , teils bis zu 600 pro cm^3 , besonders hoch in Wolken rascher Bildungsprozesse
Sicht	schlecht, manchmal nur einige Meter
Farbe	allgemein in Grauabstufungen; bei dichten Wolken ist der von der Sonne angestrahlte Teil wegen der starken Reflexion glänzend weiß
Eigenschatten	ja; je nach Dichte und Mächtigkeit hellgrau bis dunkel
Wolkenränder	scharf ausgeprägt bei dichten Wasserwolken (Cu, Sc und Cb bis -10 °C ; manchmal auch beim Ac); sonst unscharf, diffus
Lichtdurchlässigkeit	gering
Photometeore	bei sehr dünnen Wolken Kränze (Korona) und Höfe (Aureole); Irisieren bei scharf gezeichneten, dünnen Rändern durch Beugung des Lichtes an gleich großen Tropfen
Relative Luftfeuchte	100 %, d.h. Wasserdampfsättigung in bezug auf Wolken-tröpfchen

Niederschlagsformen aus Wasserwolken (Tab. 5)

Gattung	Art des fallenden Niederschlages
St	Sprühregen, unterkühlter Sprühregen
maritime Cu con	Regenschauer; in mittleren Breiten schwach, in den Tropen auch stark

1.2.4 Mischwolken

Mischwolken enthalten Wassertröpfchen und Eiskristalle in Form von mehr oder weniger verzweigten Schneesternchen und bei stärkeren Vertikalbewegungen auch Graupel- oder Hagelkörner.

Die Anzahl der Wolkenelemente ist im allgemeinen geringer als in reinen Wasserwolken aber größer als in Eiswolken und in Cb mit starken Vertikalbewegungen am höchsten.

Weil in Mischwolken der Wasserdampf gegenüber der festen Phase übersättigt ist, wachsen die Eisteilchen durch Sublimation zu Eiskristallen heran und können so Niederschlagselemente bilden, die der Wolke eine streifige und verschwommene Struktur geben.

Fallen die Schneekristalle als Fallstreifen oder als Niederschlag aus der Wolke aus, dann wird die Basis unscharf und diffus.

Anfangs entstehen im Mischwolkenbereich von unter -10 °C Eiskristalle, die wachsen, sich zu Schneeflocken verbinden und bei Temperaturen von über 0 °C zu großtropfigem Regen schmelzen. In Wolken mit hohem Flüssigwassergehalt und größeren Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Schneesternchen und Tröpfchen vergraupeln die Eisteilchen bei ihren Kollisionen durch das Anfrieren von unterkühlten flüssigen Elementen. Da dazu im allgemeinen große Aufwindgeschwindigkeiten notwendig sind, tritt der Vergraupelungsprozess normalerweise nur im Cb auf und ist in Mischwolken mit geringen Vertikalgeschwindigkeiten selten.

Wird bei höheren Temperaturen aus dem Sc stärkerer Regen oder anderer erwähnenswerter Niederschlag beobachtet, dann stammen sie aus höheren, darüber liegenden Wolkenschichten.

Der Ac enthält im Bildungsstadium häufig eine geringe Anzahl von Eisteilchen, die aufgrund der Übersättigung gegenüber Eis anwachsen und sich als Fallstreifen (virga) bemerkbar machen, so dass eine reine unterkühlte Wasserwolke zurückbleibt.

Typische Merkmale von Mischwolken (Tab. 6)

Gattungen	Ns, As, Cb
mittlerer Temperaturbereich	von -10 bis -35 °C
mittlere Höhen in den gemäßigten Breiten	4 bis 7 km
Wolken-elemente	Wassertröpfchen und Eiskristalle Eiskristallformen ≤ 0 °C bis -3°C hexagonale Platten ≤ -3 °C bis -5°C Nadeln ≤ -5 °C bis -8°C Prismen ≤ -8 °C bis -12°C hexagonale Platten ≤ -12 °C bis -16°C dendritische Kristalle ≤ -16 °C bis -25°C hexagonale Platten ≤ -25 °C bis -50°C Prismen
Art	
Anzahl	im allgemeinen geringer als in Wasserwolken
Sicht	schlecht, mit der Höhe zunehmend (nicht im Cb)
Farbe	hell- bis dunkelgrau
Eigenschatten	je nach Dichte und Mächtigkeit blaugrau bis sehr dunkel
Wolkenränder	diffus, streifig oder schlierig
Lichtdurchlässigkeit	gering, mit der Höhe besser werdend (nicht im Cb)
Photometeore	keine
Relative Luftfeuchte	noch 100 % ☞ mehr oder minder starke Eisübersättigung ☞ Sublimation

Weil Mischwolken in unseren Breiten die hauptsächlichen niederschlagsbildenden Wolken sind, kann man sie auch am Niederschlag erkennen, der aus ihnen fällt.

Mischwolken und Niederschlag (Tab. 7)

Gattung	Fallender Niederschlag	
	Art	Eigenschaft/Intensität
As und Ns	Regen, Schnee, unterkühlter Regen, Eiskörner	räumlich und zeitlich ausgedehnt, kaum stärkere Intensitätsschwankungen
Cb	Regen-, Schnee-, Reif- und Frostgraupel-, Hagelschauer	räumlich und zeitlich begrenzt, starke Intensitätsschwankungen
nur in der kalten Jahreszeit bei tieferen Temperaturen		
St, Nebel	Schneegriesel, Eisnadeln (bei sehr tiefen Temperaturen)	
Sc	Regen, Schnee, manchmal Reifgraupel	meist nur geringer Niederschlag

1.2.5 Eiswolken

Reine Eiswolken bilden sich grundsätzlich erst unter -35 °C , also etwa in Höhen von oberhalb 6000 bis 7000 m. Eiswolken bestehen aus Eiskristallen in Form von sechseckigen Säulen oder Plättchen, wobei die Prismen überwiegen.

Die Anzahl der Wolkenelemente ist in Eiswolken aufgrund des geringen Wasserdampfgehaltes der Luft bei diesen tiefen Temperaturen erheblich kleiner als in Wasserwolken und beträgt teilweise nur 100 Elemente pro m^3 . Zu den Gattungen der Eiswolken zählen Cirrus (Ci), Cirrostratus (Cs) und Cirrocumulus (Cc).

Typische Merkmale von Eiswolken (Tab. 8)

Gattungen	Ci, Cc, Cs
Bemerkungen	☞ Cc enthält im Bildungsstadium gelegentlich wenige, kleine unterkühlte Tröpfchen, dann virga
mittlerer Temperaturbereich	unter -35 °C
mittlere Höhen in den gemäßigten Breiten	5 bis 13 km, bis zur Tropopause
Wolken-elemente	Art Eiskristalle (Prismen)
Anzahl	teils nur 100 pro m^3 , im Ci spi wesentlich mehr
Sicht	relativ gut, teils bis zu einigen Kilometern; im Ci spi gering
Farbe	weiß, häufig seidiger Glanz; in der Dämmerung Verfärbung wie bei allen Wolken
Eigenschatten	keine; nur bei Ci spi möglich, dann Grautöne
Wolkenränder	diffus, ausgefranst, faserige Struktur
Lichtdurchlässigkeit	gut, Gegenstände werfen Schatten
Photometeore	Halo-Erscheinungen durch Brechung/Spiegelung in Form von Ringen ($r < 22/46^\circ$), Nebensonnen, Lichtsäule u.v.a., teils farbig, mit rötlichem Innenrand
Relative Luftfeuchte	< 100 %, aber Wasserdampfsättigung in bezug auf Eis; z.B. bei -35 °C ☞ 71 % -40 °C ☞ 68 % -45 °C ☞ 65 % -50 °C ☞ 62 %

Die Tabelle 9 auf der nächsten Seite enthält noch einmal die typischen Merkmale von Wasser-, Eis- und Mischwolken.

Zusammenfassung der Merkmale von Wolken (Tab. 9)

	Wasserwolken	Mischwolken	Eiswolken
Gattungen	St, Sc, Cu, Ac; dicht ☁ Cu, Sc, (Ac) Ac ist im Bildungsstadium gelegentlich eine Mischwolke, dann virga; bei $t < -10\text{ °C}$ sind auch St u. Sc Mischwolken und führen zu entsprechenden Niederschlägen	Ns, As, Cb	Ci, Cc, Cs Cc ist im Bildungsstadium gelegentlich eine Mischwolke, erkennbar an virga
mittlerer Temperaturbereich	über -10 °C	von -10 bis -35 °C	unter -35 °C
mittlere Höhe in gemäßigten Breiten	0 bis 4 km, ab 2 km unterkühlt	4 bis 7 km	5 bis 13 km, bis zur Tropopause
Wolkenelemente	Art Wassertröpfchen, $r = 1 - 50\text{ }\mu\text{m}$	Wassertröpfchen und Eiskristalle $\leq 0\text{ °C}$ bis -3 °C hexagonale Platten $\leq -3\text{ °C}$ bis -5 °C Nadeln $\leq -5\text{ °C}$ bis -8 °C Prismen $\leq -8\text{ °C}$ bis -12 °C hexagonale Platten $\leq -12\text{ °C}$ bis -16 °C dendritische Kristalle $\leq -16\text{ °C}$ bis -25 °C hexagonale Platten $\leq -25\text{ °C}$ bis -50 °C Prismen	Eiskristalle (Prismen)
Anzahl	> 100 , teils bis zu 600 pro cm^3 , bes. hoch in Wolken rascher Bildungsprozesse	im allgemeinen geringer als in Wasserwolken	teils nur 100 pro m^3 , im Ci spi wesentlich mehr
Sicht in der Wolke	schlecht, manchmal nur einige Meter	schlecht, mit der Höhe zunehmend (nicht im Cb)	relativ gut, teils bis zu einigen Kilometern; im Ci spi gering
Farbe	allg. in Grauabstufungen; bei dichten Wolken ist der von der Sonne angestrahlte Teil wegen der starken Reflexion glänzend weiß	hell- bis dunkelgrau	weiß, häufig seidiger Glanz; in der Dämmerung Verfärbung wie bei allen Wolken
Eigenschatten	je nach Dichte und Mächtigkeit hellgrau bis dunkel	je nach Dichte und Mächtigkeit blaugrau bis sehr dunkel	nur bei Ci spi möglich, dann Grautöne
Wolkenränder	scharf gezeichnet bei dichten Wolken, sonst unscharf, diffus	diffus, streifig oder schlierig	diffus, ausgefranst, faserige Struktur
Lichtdurchlässigkeit	gering	gering, mit der Höhe besser werdend (nicht im Cb)	gut, Gegenstände werfen Schatten
Photometeore	bei sehr dünnen Wolken Kränze (Korona) und Höfe (Aureole); Irisieren bei scharf gezeichneten, dünnen Rändern durch Beugung des Lichtes an gleichgroßen Tropfen	keine	Halo-Erscheinungen durch Brechung/Spiegelung in Form von Ringen ($r < 22/46^\circ$), Nebensonnen, Lichtsäule u.v.a., teils farbig, mit rötlichem Innenrand
Relative Feuchte in der Wolke	100 %, d.h. Wasserdampfsättigung in bezug auf Wolkentropfen	noch 100 %, d.h. mehr oder minder starke Eisübersättigung, so dass Sublimation erfolgt	$< 100\%$, aber Wasserdampfsättigung in Bezug auf Eis; z.B. bei -35 °C ☁ 71 % -40 °C ☁ 68 % -45 °C ☁ 65 % -50 °C ☁ 62 %

1.3 Internationale Wolkenklassifikation

Das Aussehen der Wolken ist abhängig von der Art, Größe und räumlichen Verteilung der Wolkenelemente in der Troposphäre, von Eigenarten in ihrer Gestalt und der Lichtdurchlässigkeit, von der Anordnung der Wolkenteile sowie von der Intensität (Helligkeit) und Farbe des auf die Wolke fallenden Lichtes bzw. der Stellung des Beobachters und der Lichtquelle zur Wolke. Obwohl die Wolken aufgrund ihrer Entstehung, der verschiedenen Arten der Wolkenelemente und ihrer ständigen Umwandlung ein unendliches Formenreichtum aufweisen, lässt sich eine begrenzte Anzahl von charakteristischen Erscheinungsbildern festlegen, die für die gesamte Erde typisch sind und von der WMO zu Gruppen zusammengefasst wurden. Diese sogenannte Wolkenklassifikation hat die WMO im internationalen Wolkenatlas verbindlich vorgeschrieben und mit speziellen Fotos dokumentiert. Die WMO unterscheidet 10 Gattungen, 14 Arten, 9 Unterarten sowie 9 Sonderformen und Begleitwolken.

1.3.1 Wolkengattungen

Die 10 Wolkengattungen ergeben sich aus der räumlichen Verteilung der Wolkenelemente in der Troposphäre und ihrer Art, d.h. ob sie aus Wassertröpfchen, und/oder Eiskristallen bestehen.

Die räumliche Verteilung der Wolkenelemente wird geprägt von der thermischen Schichtung und die Art der Teilchen ist von ihrer Bildungstemperatur bzw. -höhe abhängig. Auch der ausfallende Niederschlag erlaubt dem aufmerksamen Beobachter Rückschlüsse auf die Art der Wolkenbestandteile zu ziehen.

Bei reinen Eiswolken des hohen Stockwerkes ist die Anzahl ihrer Elemente oft so gering, dass ihre räumliche Verteilung meist keinem Ordnungsmerkmal entspricht. Diese Wolken werden aufgrund ihres haarähnlichen Aussehens 'Cirrus' (lat., Haarlocke, Federbusch) genannt.

Nimbuswolken (nimbus  lat., Niederschlag) sind Wolken aus denen Niederschlag fällt. Nimbostratus ist eine Niederschlagswolke mit dem Stratus- und der Cumulonimbus eine mit dem Cumulus-Merkmal.

Räumliche Verteilungsmerkmale der Wolkenelemente (Tab. 10)

Räumliches Verteilungsmerkmal		Eigenschaft/ Schichtung	Wolkengattung/-art			
Art	Definition		Stockwerk			spez. Art
			tief	mittel	hoch	
Stratus-Merkmal	einförmige Schichtwolken ohne wesentliche Helligkeitsunterschiede und Konturen in ausgedehnten Feldern oder Schichten, die den Himmel ganz oder teilweise bedecken	stratiform	St	As	Cs	spi*
		stabil		Ns	Ci*	
Cumulus-Merkmal	Einzelwolken in Form von mehr oft vertikal als horizontal entwickelten Haufen, Türmen bzw. Flocken oder zinnenartigen Türmchen	cumuliform	Cu Cb	Ac*	Cc*	flo*
		labil	Sc*			cas*
Strato-cumulus-Merkmal	Schichtwolken mit wesentlichen Helligkeitsunterschieden und Konturen in Form von Flecken, Feldern oder den ganzen Himmel bedeckenden Schichten mit oft regelmäßiger schollen-, schuppen-, ballen- oder walzenartiger Struktur	stratiform	Sc*	Ac*	Cc*	str*
		stabil labil				len*

* : nur zugehörige Arten der Spalte "spez. Art"

Verbindet man die drei räumlichen Verteilungsmerkmale 'Stratus', 'Cumulus' und 'Stratocumulus' mit der Art der Wolkenelemente, die man aus dem Aussehen, der Höhe und dem Niederschlag der Wolke entnehmen kann, so erhält man 11 Gattungen - 4 Stratus- (St, As, Cs, Ns), 4 Cumulus- (Cu, Ac, Cc, Cb) und 3 Stratocumulus-Gattungen (Sc, Alto-Stratocumulus, Cirro-Stratocumulus).

Wolkengattungen (Tab. 11)

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Abkürzung
Cirrus	hohe Federwolke	Ci
Cirrocumulus	hohe Schäfchenwolke	Cc
Cirrostratus	hohe Schleierwolke	Cs
Alto cumulus	grobe Schäfchenwolke	Ac
Altostratus	mittelhohe Schichtwolke	As
Nimbostratus	Regen-Schichtwolke	Ns
Stratocumulus	Schicht-Haufenwolke	Sc
Stratus	niedrige Schichtwolke	St
Cumulus	Haufenwolke	Cu
Cumulonimbus	Schauer- u. Gewitterwolke	Cb

Mit dem Ci, der bis auf den 'spissatus' nicht von den drei räumlichen Verteilungsmerkmalen erfasst wird, ergeben sich aus verschlüsselungstechnischen Gründen zwei überzählige Gattungen (es gibt nur 10 Ziffern von 0 bis 9), so dass ihre Anzahl auf 10 beschränkt wurde. Altostratocumulus wurde in Ac str und Cirrostratocumulus in Cc str umbenannt.

Die 10 Gattungen schließen sich gegenseitig aus, d.h. eine Wolke kann nur einer einzigen Gattung angehören.

Die lateinischen Bezeichnungen der Wolken stammen in ihrer Ursprungsform von dem 1772 in London geborenem Engländer Luke Howard, der mit seiner ersten Wolkenklassifikation Johann Wolfgang von Goethe so begeisterte, dass dieser ihm und einzelnen Wolkengattungen einige Gedichte widmete ('Atmosphäre', 'Howards Ehrengedächtnis', 'Stratus', 'Cumulus', 'Cirrus' und 'Nimbus').

Aussehen der Wolkengattungen (Tab. 12)

Lat. Bezeichnung	Allgemeines Aussehen der Wolke
Cirrus	isolierte Wolken, zarte Fäden, dichtere Flecken, weiß, faserig, seidiger Glanz
Cirrocumulus	Flecken, Felder, Schichten, weiß, körnig geripelt
Cirrostratus	weißlicher Schleier, faserig oder glatt
Alto cumulus	weißliche bis graue Flecken, Felder, Schichten, mosaikartig, wogenförmig, Eigenschatten
Altostratus	blaugraue Schicht
Nimbostratus	graue bis dunkle Schicht
Strato cumulus	graue, teils weißliche Flecken, Felder, Schichten, mosaikartig, wogenförmig, Eigenschatten
Stratus	durchweg graue, einförmige Schicht
Cumulus	Einzelwolke mit Vertikalentwicklung, bei scharfen Rändern glänzend weiß, teils blumenkohlartige Gipfel
Cumulonimbus	vertikal sehr mächtige Wolke, Ränder schlierig, streifig; Gipfel glatt oder ausgefranst, gelegentlich ambossförmig; Basis dunkel, drohend aussehend

1.3.2 Wolkenarten

Die 14 Arten erläutern Eigenarten in der Gestalt der Wolken sowie Unterschiede ihres inneren Aufbaus. Jeder Wolkengattung ist nur eine Art zuordenbar.

Wolkenarten (Tab. 13)

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Abkürzung
fibratus	faserig	fib
uncinus	haken-, krallenförmig	unc
spissatus	dicht	spi
castellanus	türmchenförmig	cas
floccus	flockig, bauschig	flo
stratiformis	schichtförmig	str
nebulosus	nebel-, schleierartig	neb
lenticularis	linsen-, mandelförmig	len
fractus	zerrissen	fra
humilis	niedrig	hum
mediocris	mittelmäßig entwickelt	med
congestus	aufgetürmt, mächtig aufquellend	con
calvus	kahl, glatt	cal
capillatus	behaart, ausgefranst, faserig	cap

1.3.3 Wolkenunterarten

Die 9 Unterarten beschreiben die Anordnung der Wolkenteile und ihre Lichtdurchlässigkeit. Jeder Gattung kann mehrere Unterarten aufweisen.

Wolkenunterarten (Tab. 14)

lateinische Bezeichnung	deutsche Bezeichnung	Abkürzung
intortus	verflochten	in
vertebratus	skelett-, grätenförmig	ve
undulatus	wellen-, wogenförmig	un
radiatus	strahlenförmig, parallele Bänder oder Streifen	ra
lacunosus	durchlöchert (runde, ausgefranst Löcher)	la
duplicatus	doppel- oder mehrschichtig	du
perlucidus	durchsichtig durch Lücken	pe
translucidus	durchscheinend	tr
opacus	nicht durchscheinend, dunkel	op

1.3.4 Sonderformen und Begleitwolken

Besondere Erscheinungen, die mit der Hauptmasse der Wolken oder auch getrennt davon auftreten können, werden als Sonderformen und Begleitwolken bezeichnet. Es gibt 6 Sonderformen und 3 Begleitwolken, die sich wie die Unterarten **nicht** gegenseitig ausschließen.

Sonderformen und Begleitwolken (Tab. 15)

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Abkürzung
incus	mit Amboss	inc
mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen an der Wolkenunterseite	mam
virga	mit Fallstreifen	vir
praecipitatio	mit Niederschlag	pra
arcus	mit Böenkragen	arc
tuba	mit Wolkenschlauch	tub
pileus	mit Kappe	pil
velum	mit Schleier	vel
pannus	mit Fetzen (Schlechtwetterfetzen)	pan

1.3.5 Mutterwolken

Entwickeln sich Teile von Wolken weiter, so können mehr oder weniger deutliche und abge sonderte Wolken heranwachsen, die der Gattung der Mutterwolke nicht angehören.

Diese Wolken werden dann mit der neuen Gattung unter Anfügung des Wortes 'genitus' bezeichnet.

Mutterwolken (Tab. 16)

Bezeichnung	Abkürzung
cirrocumulogenitus	ccgen
altocumulogenitus	acgen
altostratogenitus	asgen
nimbostratogenitus	nsgen

Bezeichnung	Abkürzung
stratocumulogenitus	scgen
cumulogenitus	cugen
cumulonimbogenitus	cbgen

1.3.6 Helligkeit und Farbe von Wolken

1.3.6.1 Helligkeit

Wolken absorbieren solare Strahlung und reflektieren sie diffus. Beide Größen sind von der Einfallrichtung der direkten Strahlung, dem Bedeckungsgrad von Wolken, der Wolkengattung, ihrer Oberflächenbeschaffenheit sowie ihrer Dicke und Dichte abhängig. Der Anteil der solaren Strahlung, der absorbiert wird, ist nur gering und liegt bei den dichtesten Wolken in der Größenordnung von 7 - 8 %. Ein Teil der diffusen Wolkenstrahlung wird diffus in den Weltraum reflektiert, der Rest gelangt durch 'diffuse Transmission' zur Erdoberfläche. Die Helligkeit einer Wolke ist damit eine Funktion des durch die Wolkenelemente diffus reflektierten und diffus transmittierten Sonnen- oder Mondlichtes; die Tabelle 17 gibt die Lichtdurchlässigkeit von Wolken bei einem Bedeckungsgrad von 8/8 an.

Lichtdurchlässigkeit von Wolken (Tab. 17)

Bewölkung (N = 8/8)	Lichtdurchlässigkeit
Cirriforme Wolken	60 %
Mittelhohe Wolken und Cu	25 - 30 %
St und Ns	15 - 20 %

N : Bedeckungsgrad

Während des Tages ist die Helligkeit im allgemeinen so stark, dass Wolken ohne Schwierigkeiten beobachtet werden können.

Nachts dagegen sind Wolken meist nur erkennbar, wenn ausreichend künstliche Beleuchtung, z.B. durch das Licht von Großstädten, vorhanden ist, oder in Mondschein Nächten die Mondphase mehr als ein Viertel beträgt.

Bei geringerer Beleuchtung ist das Licht des Erdtrabanten nicht hell genug, um entferntere, vor allem dichte Wolken, festzustellen. In mondlosen Nächten kann durch die Abdeckung von Sternen auf das Vorhandensein von Wolken geschlossen werden.

Das Licht zur Wolkenbeobachtung stammt aber nicht nur unmittelbar von Sonne oder Mond sondern kann auch vom Erdboden herrühren, wenn die einfallende Strahlung von Eis oder Schneeflächen reflektiert wird.

Dunst oder besondere Lichterscheinungen (Halo, Regenbogen, Korona, Glorie usw..) können auch zu einer Veränderung der Helligkeitsverhältnisse einer Wolke führen.

1.3.6.2 Farbe

Die Farbe der Wolken wird von der Farbe des einfallenden Lichtes bestimmt. Dunst verändert die Färbung, so dass entfernte Wolken gelb, orange oder rot erscheinen können; auch besondere Lichterscheinungen, wie Halo, Regenbogen, Korona, Glorie usw.. haben einen Einfluss auf die Farbe der Wolken.

Bei genügend hohem Sonnenstand sehen die Wolken oder Teile davon im direkten Sonnenlicht weiß oder grau aus, und die Wolkenteile, die das Licht in der Hauptsache vom blauen Himmel als diffuse Sonnenstrahlung erhalten, sind blaugrau.

Bei Annäherung der Sonne an den Horizont wechselt ihre Farbe von gelb über orange zu rot, so dass auch die Wolken ihre Färbung ändern.

Bei niedrigem Sonnenstand treten auch Farbanpassungen auf; hohe Wolken können durchaus noch weiß aussehen, während mittelhohe bereits eine kräftige Orange- bzw. Rotfärbung zeigen und sehr tiefe, bereits im Erdschatten liegende Wolken grau erscheinen.

Nachts ist die Helligkeit im allgemeinen zu gering, um Farben unterscheiden zu können, so dass alle wahrnehmbaren Wolken mit Ausnahme derer, die vom Mond beleuchtet werden und weißlich erscheinen, grau bis schwarz aussehen.

1.3.7 Beschreibung der Wolken im Wolkenatlas

Die im internationalen Wolkenatlas beschriebenen Merkmale der 10 Wolkengattungen sind nur für Beobachtungen gültig, die unter folgenden Voraussetzungen stattfinden:

- Der Beobachter befindet sich an der Erdoberfläche entweder auf Land in Gebieten ohne Gebirgserhebungen oder auf See;
- die Luft ist klar; Trübungserscheinungen wie z.B. Nebel, Dunst, Staub und Rauch fehlen;
- die Sonne steht hoch genug, um die übliche Helligkeit und Färbung von Wolken zu bewirken;
- die Wolken befinden sich hoch über dem Horizont, so dass Auswirkungen der Perspektive vernachlässigt werden können.

Werden unter anderen Bedingungen als den genannten Wolkenbeobachtungen durchgeführt, so müssen die Definitionen entsprechend angepasst werden.

Die nachfolgenden 10 Tabellen zeigen die WMO-Klassifikation der Wolken und ihre Beschreibung, so wie sie im internationalen Wolkenatlas aufgeführt sind.

Cirrus (Tab. 18)

Definition	Isolierte Wolken in Form weißer, zarter Fäden, oder weißer bzw. überwiegend weißer Flecken oder schmaler Bänder. Diese Wolken zeigen ein faseriges (haarähnliches) Aussehen und/oder einen seidigen Schimmer.		
Arten	fib	Dünne weiße Fasern oder Fäden, fast geradlinig, oder unregelmäßig gebogen, oder scheinbar regellos miteinander verflochten	S.181
	unc	Kommaförmige oder hakenförmige oder in einem nicht abgerundeten Büschel endende Fasern und Fäden	S.163
	spi	Dichte Flecken, die bei Blickrichtung gegen die Sonne schwach grau aussehen; die Sonne kann durch Ci spi verschleiert, ihre Umrisse undeutlich oder völlig verdeckt werden	S.167
	cas	Kleine, abgerundete Türmchen oder Zinnen, die aus einer gemeinsamen Cirrus-Basis herauswachsen	
	flo	Kleine, isolierte, runde Ci-Büschel, oft mit Schleppen versehen (selten)	S.168 S.169
Unterarten	in	Unregelmäßig gebogene und ineinander verflochtene Cirrus-Fäden	
	ra	einzelne, in breiten parallelen Bändern scheinbar gegen den Horizont zusammenlaufende Cirrus-Teile	S.180
	ve	Fischgrätenartig oder wie eine Wirbelsäule mit Rippen angeordnete Cirrus-Teile	S.166
	du	Cirruswolken in zwei oder mehreren dicht übereinander angeordneten Schichten, die manchmal teilweise miteinander verwachsen sind	S.181
Sonderformen u. Begleitwolken	mam	Cirrus mit hängenden, beutelförmigen Quellformen an der Unterseite	
Art der Wolkenbestandteile	Eiskristalle (Prismen)		
Niederschlagsformen	nein		
Optische Erscheinungen	Halo möglich, aber nicht als geschlossener Ring		
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> - durch Turbulenz bei vertikaler Windscherung - aus anderen Wolken <ul style="list-style-type: none"> • aus Virga von Cc und Ac • aus verdunstendem Cs • aus dem Oberteil eines Cb 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken	<p><u>Ci flo/Cc flo und Ci cas/Cc cas</u> Ci-Büschel oder -Türmchen haben eine Breite von mehr als 1°, Cc-Büschel oder Türmchen von weniger als 1°.</p> <p><u>Ci/Cs</u> Ci weist eine zusammenhanglose Struktur auf und Ci-Felder oder -Bänder zeigen eine geringere horizontale Erstreckung und eine geringere Breite ihrer zusammenhängenden Teile als Cs.</p> <p><u>Ci flo/Ac flo</u> Ci flo zeigt eine seidigere und faserigere Feinstruktur als Ac flo.</p> <p><u>Ci spi/As</u> Ci spi weist eine geringere horizontale Ausdehnung als As und eine überwiegend weiße Färbung.</p>		

1° : entspricht etwa der Breite des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm

Hinweis

Die Angaben der Seitenzahlen neben den Arten, Unterarten, Sonderformen und Begleitwolken in der rechten Spalte der Tabelle beziehen sich auf den internationalen Wolkenatlas.

Cirrocumulus (Tab. 19)

Definition	Dünne weiße Flecken, Felder oder Schichten von Wolken ohne Eigenschatten, die aus sehr kleinen, körnig geripgelt oder ähnlich aussehenden Teilen bestehen, die miteinander verwachsen oder isoliert und mehr oder weniger regelmäßig angeordnet sind. Die meisten Wolkenteile haben eine Breite von weniger als 1°.		
Arten	str	Ausgedehnte horizontale Cc-Felder oder -Schichten	S.191
	len	linsen- oder mandelförmige, oft sehr langgestreckte Cc-Bänke mit gewöhnlich scharf ausgeprägten Umrissen	S.194
	cas	Einzelne Cc-Teile mit sehr kleinen turmartigen Aufquellungen, die aus einer gemeinsamen Basis herauswachsen (selten)	
	flo	Cc-Wolken aus sehr kleinen, unten zerfetzten Büscheln (selten)	
Unterarten	un	Wellenförmig angeordnete Cc-Felder	S.193
	la	Cc-Felder mit kleinen, runden, vielfach ausgefransten Löchern, wo-durch oft das Aussehen eines Netzes oder einer Wabe entsteht	S.193
Sonderformen u. Begleitwolken	vir	Fallstreifen aus Eiskristallen, die an der Unterseite des Cc schräg oder senkrecht herabhängen	
	mam	Hängende, beutelförmige Quellformen an der Unterseite des Cc	
Art der Wolkenbestandteile	Fast ausschließlich Eiskristalle; im Bildungsstadium können unterkühlte Wassertröpfchen vorhanden sein, die infolge der tiefen Temperaturen jedoch schnell durch Eiskristalle ersetzt werden		
Niederschlagsformen	nein		
optische Erscheinungen	Immer so durchscheinend, dass die Stellung von Sonne und Mond zu erkennen ist; manchmal kann Korona-Bildung und Irisieren beobachtet werden		
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> – Konvektion in dünnen labilen Luftschichten (Cc str la) – Hebung feuchter Luftschichten auf der Luvseite von Hindernissen und durch Leewellen – durch Labilisierung von dünnen Ci- oder Cs-Schichten infolge Ausstrahlung oder anhaltender Hebung 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Cc flo/Ci flo und Cc cas/Ci cas</u> Cc-Büschel oder -Türmchen haben eine Breite von weniger als 1°, Ci-Büschel oder -Türmchen eine von mehr als 1°.</p> <p><u>Cc-Felder/Ci/Cs</u> Cc zeigt eine gerippelte Form und ist in sehr kleine Wölkchen unterteilt, auch wenn darunter die für Ci und Cs charakteristischen faserigen, seidigen oder glatten Abschnitte sind, die aber nur den kleineren Teil ausmachen.</p> <p><u>Cc/Ac</u> – Cc-Teile sind kleiner als 1° und haben keine Eigenschatten, Ac-Teile sind größer als 1° und weisen meist Eigenschatten auf; – Korona-Bildung ist bei Cc selten, bei dünnem Ac häufig.</p>		

1° : entspricht etwa der Breite des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm

5° : entspricht etwa der Breite von drei Fingern bei ausgestrecktem Arm

Cirrostratus (Tab. 20)

Definition	Durchscheinender, weißlicher Wolkenschleier von faserigem (haarähnlichem) oder glatterm Aussehen, der den Himmel ganz oder teilweise bedeckt und im allgemeinen Halo-Erscheinungen hervorruft		
Arten	fib	Faseriger Cs-Schleier	S.188
	neb	Glatter, nebelartiger Cs-Schleier	S.186
Unterarten	du	Zwei oder mehrschichtiger Cs	
	un	Wellenförmiger Cs	
Sonderformen u. Begleitwolken	Nicht erwähnenswert		
Art der Wolkenbestandteile	Eiskristalle		
Niederschlagsformen	nein		
optische Erscheinungen	Cs ist immer so dünn, dass Gegenstände an der Erdoberfläche Schatten werfen, außer bei niedrigem Sonnenstand; in dünnen Cs-Schleiern treten häufig Halo-Erscheinungen auf.		
Entstehung	<p>– Großräumige Hebungsprozesse (Aufgleitvorgänge)</p> <p>– Aus anderen Wolken</p> <ul style="list-style-type: none"> • aus Virga von Cc • durch das Zusammenwachsen von Ci- und Cc-Teilen • durch dünner werdenden As • durch Ausbreitung eines Cb inc 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Cs/Ci</u> Cs ist ein zusammenhängender Wolkenschleier, der eine größere horizontale Ausdehnung als Ci-Felder oder -Bänder aufweist.</p> <p><u>Cs/Ac-/Cc-Felder</u> Cs hat im allgemeinen ein diffuses Aussehen und zeigt weder eine körnige oder gerippte Struktur, noch schuppenartige Teile, Ballen, Walzen usw., so wie es bei Ac und Cc der Fall ist.</p> <p><u>Cs/As tr</u> – Cs ist weißlich und von geringerer vertikalen Mächtigkeit als As tr, so dass Gegenstände am Erdboden immer noch Schatten werfen, während bei As tr Schattenbildung nicht mehr erfolgt.</p> <p>– bei Cs tritt Halo auf, bei As tr nicht</p>		

1° : entspricht etwa der Breite des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm

Alto cumulus (Tab. 21)

Definition	Weiße und/oder graue Flecken, Felder oder Schichten von Wolken, im allgemeinen mit Eigenschatten, aus schuppenartigen Teilen, Ballen, Walzen usw. bestehend, die manchmal teilweise faserig oder diffus aussehen und zusammengewachsen sein können. Die meisten der regelmäßig angeordneten kleinen Wolkenteile haben gewöhnlich eine Breite von 1 - 5°		
Arten	str	Ausgedehnte horizontale Felder oder Schichten	S.131
	len	linsen- oder mandelförmige, oft sehr langgestreckte Ac-Bänke mit deutlich ausgeprägten Umrissen	S.137
	cas	Reihe von Türmchen, die aus einer gemeinsamen Basis herauswachsen	S.154
	flo	Kleine, isolierte Büschel mit zerfransten Unterteilen und oft mit Schleppen	S.156
Unterarten	tr	Dünnere, lichtdurchlässiger Ac mit erkennbarer Stellung von Sonne und Mond	
	pe	Kleine, unregelmäßige Lücken in der Ac-Schicht, durch die das Himmelsblau oder höhere Wolkenschichten sichtbar sind	
	op	Dichter Ac, der Sonne und Mond völlig verdeckt	
	du	Ac in zwei oder mehreren Schichten	
	un	Wogenförmig angeordnete Ac-Schicht, oft mit langgestreckten parallelen Walzen, die durch scharf begrenzte, wolkenlose Bahnen voneinander getrennt sein können	
	ra	Ac mit parallelen Streifen oder Bändern, scheinbar am Horizont zusammenlaufend	
	la	Ac-Schicht mit mehr oder weniger regelmäßig verteilten, runden, oft ausgefransten Löchern, wodurch das Aussehen eines Netzes oder einer Wabe entsteht (selten)	
Sonderformen und Begleitwolken	vir	Ac mit Fallstreifen, die meist aus Eiskristallen bestehen	
	mam	Hängende, beutelförmige Quellungen an der Unterseite des Ac	
Art der Wolkenbestandteile	Überwiegend und meist unterkühlte Wassertröpfchen; im Bildungsstadium auch wenige Eiskristalle möglich, die jedoch durch Sublimation rasch wachsen und als virga ausfallen		
Niederschlagsformen	normalerweise nicht		
optische Erscheinungen	<ul style="list-style-type: none"> – an dünnem Ac Corona-Bildung und Irisieren – am Ac vir Halo-Erscheinungen in Form von Nebensonnen und Lichtsäulen 		
Entstehung durch	<ul style="list-style-type: none"> – großräumige Hebungsprozesse (Aufgleiten) an ihren Randzonen – Turbulenz und Konvektion im mittleren Stockwerk – Ausbreitung von Cu oder Cb – Hebung feuchter Luftschichten luvseitig von Hindernissen und durch Leewellen – Umbildungsprozesse bei As oder Ns 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Ac virga/Ci</u> Ac vir ist nicht überall faserig oder seidig schimmernd wie Ci</p> <p><u>Ac str/As</u> Im Zweifelsfall werden mittelhohe Wolkenschichten als Ac bezeichnet, sofern irgendwelche Anzeichen von schuppenartigen Teilen, Ballen, Walzen usw. vorhanden sind.</p> <p><u>Ac str/Sc str</u> Bei Ac haben die meisten der regelmäßig angeordneten Wolkenteile eine Breite von 1° bis 5°, bei Sc von mehr als 5°.</p> <p><u>Ac flo/Cu fra/hum</u> Ac hat häufig faserige Schleppen und ist meist kleiner als Cu.</p> <p><u>Ac/Cc</u> – Ac-Teile sind größer als 1° und weisen meist Eigenschatten auf; Cc-Teile dagegen sind kleiner als 1° und haben keine Eigenschatten – Corona-Bildung ist bei Cc selten, bei dünnem Ac häufig</p>		

1° : entspricht etwa der Breite des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm

Altostratus (Tab. 22)

Definition	Graue oder bläuliche Wolkenfelder oder -schichten, streifig, faserig oder einförmig aussehend, den Himmel ganz oder teilweise bedeckend; die Sonne kann völlig verdeckt sein bzw. der As zeigt sich stellenweise so dünn, dass sie wenigstens schwach wie durch Mattglas erkennbar ist; keine Halo-Erscheinungen		
Arten	keine		
Unterarten	tr	Dünnere As, durch den die Sonne wenigstens noch andeutungsweise wie durch Mattglas sichtbar ist	S.124
	op	Dichtere As, der die Sonne völlig verdeckt	S. 213
	du	Zwei oder mehrere, dicht übereinander liegende As-Schichten, die teilweise zusammenwachsen können	
	un	As mit Wogenbildungen	
	ra	As mit paralleler Streifen, die scheinbar am Horizont zusammenlaufen	
Sonderformen u. Begleitwolken	vir	As mit Fallstreifen an der Untergrenze	
	pra	As mit Niederschlag, der den Erdboden erreicht	
	pan	As mit zerrissenen Wolkenfetzen, die in tieferen, turbulenten Luftschichten durch Feuchteanreicherung infolge von verdunstendem Niederschlag entstehen	
	mam	As mit warzenartigem Aussehen an der Unterseite	
Art der Wolkenbestandteile	Wassertröpfchen, Eiskristalle, Schneeflocken		
Niederschlagsformen	Meist Dauerniederschlag als Regen, unterkühlter Regen, Schnee oder Eiskörner		
optische Erscheinungen	keine		
Entstehung	<p>– Großräumige Hebungsprozesse (Aufgleitvorgänge)</p> <p>– aus anderen Wolken</p> <ul style="list-style-type: none"> • aus Cs, der an Mächtigkeit gewinnt • aus Ns, der an Mächtigkeit verliert • aus Ac, wenn virga in größerem Maße aus dem Ac fällt • aus Virga von Cc <p>• vor allem in den Tropen durch Ausbreitung der mittleren und oberen Cb-Teile an Inversionen</p>		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>As tr/Cs</u> – Bei As keine, bei Cs Schattenbildung von Gegenständen am Erdboden. – Bei As im Gegensatz zu Cs keine Halo-Erscheinungen.</p> <p><u>As/Ci spi</u> As zeigt keine weiße Färbung und eine größere horizontale Ausdehnung als Ci spi.</p> <p><u>Ac str/As</u> As hat keine Anzeichen von schuppenartigen Teilen, Ballen, Walzen usw..</p> <p><u>As op/Ns</u> As ist höher, dünner, heller und an seiner Unterseite weniger gleichförmig als Ns; fällt kein Niederschlag, wird die Wolke im Zweifelsfalle als As bezeichnet.</p> <p><u>As/St</u> – As besitzt Mattglaswirkung und ist niemals weiß, wie es bei dünnem St gegen die Sonne sein kann; – aus As fällt Regen, unterkühlter Regen, Schnee, Eiskörner und aus St Sprühregen, Schneegriesel und Eisnadeln.</p>		

Nimbostratus (Tab. 23)

Definition	Graue, häufig dunkle, die Sonne völlig verdeckende Wolkenschicht, die bei mehr oder weniger anhaltendem, meist den Erdboden erreichendem Niederschlag diffus aussieht; darunter treten oft niedrige, zerfetzte Wolken auf, die mit der Untergrenze des Ns zusammengewachsen sein können	
Arten	keine	
Unterarten	keine	
Sonderformen u. Begleitwolken	pra	Ns mit Niederschlag, der den Erdboden erreicht
	vir	Ns mit Fallstreifen an der Untergrenze
	pan	Ns mit zerrissenen Wolkenfetzen, die in tieferen, turbulenten Luftschichten durch Feuchteanreicherung infolge von verdunstendem Niederschlag entstehen und mit dem Ns zusammenwachsen können
Art der Wolkenbestandteile	Wassertröpfchen, Eiskristalle, Schneeflocken	
Niederschlagsformen	Meist Dauerniederschlag in Form von Regen, unterkühltem Regen, Schnee, Eiskörnern	
optische Erscheinungen	keine	
Entstehung	<p>– Großräumige Hebungsprozesse (Aufgleiten)</p> <p>– aus anderen Wolken</p> <ul style="list-style-type: none"> • aus As, der an Mächtigkeit gewinnt • aus Cb durch horizontale Ausbreitung • aus Cb, durch Ausbreitung des mittleren oder oberen Mischwolkenbereiches an Inversionen 	
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Ns/As op</u> – Ns ist tiefer, dichter, dunkler und an seiner Unterseite gleichförmiger als As; – fällt Niederschlag, wird die Wolke im Zweifelsfalle als Ns bezeichnet.</p> <p><u>Ns/As op/Sc op</u> Ns besitzt im Gegensatz zu Ac op und Sc op keine klar abgegrenzten Wolken- teile oder keine deutlich ausgeprägte Untergrenze.</p> <p><u>Ns/St op</u> aus Ns fällt Regen, unterkühlter Regen, Schnee, Eiskörner und aus St Sprüh- regen, Schneegriesel und Eisnadeln.</p> <p><u>Ns/Cb</u> treten Blitz, Donner und/oder Hagel auf, dann handelt es sich um einen Cb, auch wenn die Wolke wie ein Ns aussieht.</p>	

Stratocumulus (Tab. 24)

Definition	Graue und/oder weißliche Flecken, Felder oder Schichten von Wolken, die fast immer dunkle Stellen aufweisen, aus mosaikartigen Schollen, Ballen, Walzen usw.. bestehen, die (ausgenommen bei Virga-Bildung) eine nicht faserige Struktur zeigen und zusammengewachsen sein können; die meisten der regelmäßig angeordneten kleineren Wolkenteile haben eine scheinbare Breite von mehr als 5°		
Arten	str	Sc in ausgedehnten horizontalen Feldern oder Schichten	S.100
	len	Linsen- oder mandelförmige, oft sehr langgestreckte Sc-Bänke mit deutlich ausgeprägten Umrissen (selten)	S.203
	cas	Sc in Form Türmchen, die aus einer gemeinsamen Basis herauswachsen (selten)	
Unterarten	tr	Dünnere, lichtdurchlässiger Sc mit erkennbarer Stellung von Sonne und Mond	
	pe	Kleine, unregelmäßige Lücken in der Sc-Schicht, durch die das Himmelsblau oder höhere Wolkenschichten sichtbar sind	
	op	Dichter Sc, der Sonne und Mond völlig verdeckt	
	du	Sc in zwei oder mehreren Schichten	
	un	Wogenförmig angeordnete Sc-Schicht, manchmal in parallelen Walzen, die durch wolkenfreie Räume voneinander getrennt sein können	S.98
	ra	Sc mit paralleler Streifen oder Bändern, die scheinbar am Horizont zusammenlaufen	
	la	Sc-Schicht mit mehr oder weniger regelmäßig verteilten, runden, oft ausgefranzten Löchern, wodurch das Aussehen eines Netzes oder einer Wabe entsteht (selten)	
Sonderformen und Begleitwolken	mam	hängende, beutelförmige Quellungen an der Unterseite des Sc	S.101
	vir	Sc mit Fallstreifen, die im Winter aus Eiskristallen bestehen	
	pra	Sc mit Niederschlag, der den Erdboden erreicht (selten)	
Art der Wolkenbestandteile	Wassertröpfchen, im Winter auch Eiskristalle und Schneeflocken (selten)		
Niederschlagsformen	Manchmal schwacher Niederschlag in Form von Regen, Schnee und Reifgraupeln		
optische Erscheinungen	bei dünnem Sc Corona-Bildung (Hof oder Kranz) und Irisieren		
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> – durch Hebung einer St-Schicht bzw. durch konvektive oder wellenförmige Umbildungsprozesse des St mit oder ohne Höhenänderung – durch Ausbreitung von Cu oder Cb – durch Wellenbildung 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Sc str/Ac str</u> Bei Sc haben die meisten der regelmäßig angeordneten Wolkenteile eine Breite von > 5°, beim Ac eine von 1° - 5°.</p> <p><u>Sc str/St/Ns/As</u> – bei Sc treten isolierte oder miteinander verwachsene, durch wesentliche Helligkeitsunterschiede gekennzeichnete Wolkenteile auf, bei St, Ns und As nicht. – Niederschlag bei Sc ist von schwacher Intensität</p> <p><u>Sc/Cu</u> Einzelne Teile des Sc treten gewöhnlich in Gruppen oder Bänken mit einer im all-gemeinen abgeflachten Oberseite auf; wenn Kuppeln beobachtet werden, dann wachsen diese im Gegensatz zu denen von Cu aus einer zusammenhängenden Basis heraus.</p>		

1° : entspricht etwa der Breite des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm

5° : entspricht etwa der Breite von drei Fingern bei ausgestrecktem Arm

Stratus (Tab. 25)

Definition	Durchgehend graue Wolkenschicht mit ziemlich einförmiger Untergrenze, aus der Niederschlag in Form von Sprühregen, Schneegriesel oder Eisnadeln fallen kann. Ist die Sonne durch die Wolken hindurch sichtbar, so sind ihre Umrisse klar zu erkennen; Halo-Erscheinungen können nur bei sehr tiefen Temperaturen auftreten; manchmal kommt Stratus auch in Form zeretzter Schwaden vor		
Arten	neb	Nebelartige, ziemlich einförmige, graue Wolkenschicht, hohe Bauwerke verdeckend	S.102
	fra	Nicht geschlossener, sondern in mehrere Teilwolken gegliederter St oder Wolkenfetzen (oft Schlechtwetterfetzen), die ihre Gestalt rasch ändern.	S.106
Unterarten	op	Dichter St, der Sonne und Mond völlig verdeckt	
	tr	Dünnere, lichtdurchlässiger St, der die Umrisse von Sonne und Mond deutlich erkennen lässt	
	un	St mit wellenförmiger Unterseite	
Sonderformen und Begleitwolken	pra	St mit Niederschlag in Form von Sprühregen, Schneegriesel oder Eisnadeln	
Art der Wolkenbestandteile	Wassertröpfchen, bei tiefen Temperaturen auch Eiskristalle		
Niederschlagsformen	Sprühregen, unterkühlter Sprühregen, Schneegriesel und Eisnadeln		
optische Erscheinungen	Bei dünnem St Koronabildung um Sonne oder Mond; bei sehr tiefen Temperaturen kann St unter besonderen Umständen auch Halo-Erscheinungen hervorrufen		
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> - St in Schichtform durch Abkühlung der bodennahen Luftschicht - St in Fetzen durch Turbulenz in der bodennahen Luftschicht, sofern die Luft mit Feuchtigkeit angereichert wird - aus anderen Wolken <ul style="list-style-type: none"> • aus Nebel, der durch Erwärmung vom Erdboden her und durch bodennahe Turbulenz aufgelöst wird • aus Sc, der bei absinkender Untergrenze sein reliefartiges Gepräge oder seine sichtbare Gliederung verliert 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>St/As</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Dünnere St kann gegen die Sonne weiß aussehen, As besitzt Mattglaswirkung und ist niemals weiß; - aus St fällt Sprühregen, Schneegriesel und Eisnadeln, aus As Regen, Schnee und Eiskörner. <p><u>St op/Ns</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - St hat normalerweise eine deutlicher ausgeprägte und einförmigere Untergrenze als Ns, - St hat andere Niederschlagsformen (s. As), - St kommt eher bei schwachem Wind vor, Ns dagegen gewöhnlich bei einer mäßigen bis starken Strömung, - Ns folgt meist Aufzugsbewölkung nach. <p><u>St fra/Cu fra</u></p> <p>St-Fetzen sind weniger weiß, weniger dicht und weniger mächtig als Cu fra.</p>		

Cumulus (Tab. 26)

Definition	Isolierte, durchweg dichte und scharf abgegrenzte Wolke, die sich vertikal in Form von Hügeln, Kuppeln oder Türmchen entwickelt; ihre aufquellenden oberen Abschnitte sehen oft wie Blumenkohl aus, die von der Sonne beschienenen Teile sind meist leuchtend weiß und ihre Untergrenze ist verhältnismäßig dunkel und verläuft fast horizontal; manchmal sind Cumuluswolken auch zerfetzt		
Arten	hum	Niedriger, abgeflachter Cu	S.77
	med	Cu von mäßiger vertikaler Ausdehnung mit kleinen Aufquellungen und emporschiessenden Teilen	S.83
	con	Hoch aufgetürmter Cu mit einem quelförmigen Oberteil, das oft wie Blumenkohl aussieht	S. 88
	fra	Cu mit stark zerfetzten Rändern, deren Umrisse sich ständig rasch verändern	
Unterarten	ra	Cu-Wolken in Reihen, die fast parallel zur Windrichtung angeordnet sind und so Wolkenstraßen bilden	S.222
Sonderformen und Begleitwolken	pil	Cu mit flacher Kappe oder Haube von geringer horizontaler Erstreckung über dem Gipfel oder am Oberteil	
	vel	Cu mit einem Wolkenschleier von großer horizontaler Ausdehnung unmittelbar oberhalb oder am Oberteil, den er manchmal durchstößt	
	vir	Cu mit herabhängenden Schleppen (selten)	
	pra	Cu mit Niederschlag in Form von Regenschauern (selten)	S.85
	arc	Cu mit Böenkragen oder -walze (selten)	
	pan	Cu mit zerrissenen Schlechtwetterfetzen unterhalb der Untergrenze (selten)	
	tub	Cu mit einem Wolkenschlauch, der Trombe (sehr selten)	S.265
Art der Wolkenbestandteile	Hauptsächlich Wassertröpfchen		
Niederschlagsformen	Aus mächtigen maritimen Cu fallen in tropischen Breiten starke Regenschauer, in mittleren Breiten meist nur schwache Regenschauer		
optische Erscheinungen	keine		
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> – durch Konvektion in vertikal mächtigen labilen Luftschichten – durch Turbulenz in feuchtilabilen Bodenluftschichten, die durch verdunstenden Niederschlag stark mit Wasserdampf angereichert werden (Cu fra, bzw. Begleitwolke pan) 		
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Cu/Sc</u> Cu sind Einzelwolken; beim Sc wachsen die Kuppeln dagegen aus einer zusammenhängenden Basis heraus und einzelne Teile des Sc treten meist in Gruppen oder Bänken mit einer im allgemeinen abgeflachten Oberseite auf.</p> <p><u>Cu/Cb</u> – Beim Cu sind die oberen Wolkenteile überall noch scharf abgegrenzt und sie zeigen keine faserige und streifige Struktur. – Treten Blitz, Donner oder Hagel auf, dann ist es ein Cb. – Im Zweifelsfall ist bei einem Regenschauer ein Cb zu melden.</p> <p><u>St fra/Cu fra</u> Cu-Fetzen sind weißer, dichter und mächtiger St fra.</p>		

Cumulonimbus (Tab. 27)

Definition	Massige und dichte Wolke von beträchtlicher vertikaler Ausdehnung in Form eines hohen Berges oder mächtigen Turmes; zumindest teilweise weist der obere Wolkenabschnitt glatte Formen auf oder ist faserig bzw. streifig und fast stets abgeflacht; dieser Teil breitet sich vielfach ambossförmig aus oder hat das Aussehen eines großen Federbusches; unterhalb der häufig sehr dunklen Untergrenze befinden sich oft niedrige, zerfetzte Wolken, die mit dem Cb zusammengewachsen sein können; der Niederschlag fällt manchmal in Virga-Form	
Arten	cal	Kahler Cb mit noch überwiegend glatten Formen und rundlichen Aufquellungen am Gipfel, die aber die scharfen Umrisse bereits verlieren S.91 S.93
	cap	Behaarter Cb, dessen oberer Teil aus einer ausgefransten, faserigen oder streifigen Wolkenmasse besteht und oft ambossartig geformt ist S.94
Unterarten	keine	
Sonderformen und Begleitwolken	pra	Cb mit Schauerniederschlag, der den Erdboden erreicht S.232
	vir	Cb mit Niederschlagsfallstreifen, die den Erdboden nicht erreichen
	pan	Cb mit Schlechtwetterfetzen unterhalb der Wolkenuntergrenze, die zum Teil mit ihr zusammengewachsen sein können
	inc	Cb mit ambossförmigen Oberteil S.224
	mam	Cb mit hängenden Quellformen an der Unterseite S.122
	pil	Cb mit flacher Kappe oder Haube von geringer horizontaler Erstreckung über dem Gipfel oder am Oberteil
	vel	Cb mit einem Wolkenschleier von großer horizontaler Ausdehnung unmittelbar oberhalb oder am Oberteil, den er manchmal durchstößt
	arc	Cb mit Böenkragen/ -walze, einem dunklen Bogen gleichend S.117
tub	Cb mit Wolkenschlauch, aus der Basis herauswachsend (selten) S.266	
Art der Wolkenbestandteile	Wassertröpfchen und besonders im oberen Teil Eiskristalle; meist auch Schneeflocken, Reif- und Frostgraupeln, Hagelkörner	
Niederschlagsformen	Schauerniederschläge in Form von Regen, Schnee, Reif- und Frostgraupeln und auch Hagel, die von Donner oder Blitz begleitet sein können	
optische Erscheinungen	keine	
Entstehung	<ul style="list-style-type: none"> - Durch Konvektion in vertikal sehr mächtigen labilen Luftschichten; die Temperatur am Wolkengipfel beträgt mindestens -25 °C bzw. der Hebungsvorgang erfasst bei Gewittern die gesamte Troposphäre. - manchmal auch durch Labilisierung von Ac, Sc, As und Ns 	
Unterschiede zwischen ähnlichen Wolken anderer Gattungen	<p><u>Cb/Ns</u> Treten Blitz, Donner und/oder Hagel auf, dann handelt es sich um einen Cb, auch wenn die Wolke wie ein Ns aussieht.</p> <p><u>Cb/Cu</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Verlieren die oberen Wolkenteile bereits teilweise ihre scharfen Umrisse und zeigt sich schon eine faserige/streifige Struktur, dann ist es ein Cb; - bei Blitz, Donner oder Hagel handelt es sich um einen Cb; - im Zweifelsfall ist bei einem Regenschauer ein Cb zu melden. 	

Die im Wolkenatlas bzw. in den Tabellen 18 - 27 enthaltenen Merkmale der Wolkengattungen - Arten, Unterarten, Sonderformen und Begleitwolken, Niederschlag, usw ... - treten mehr oder minder häufig auf. Abweichungen davon sind jedoch durchaus auch zu beobachten.

Kurzbeschreibung der Wolkengattungen (Tab. 28)

Gattung	Gemeins. Merkmal	Spezielles Merkmal	Arten	Unterarten	S./Begleitwolken
Cs	Schichtwolken, den Himmel ganz oder teilweise bedeckend	Durchscheinender, weißlicher, haarähnlicher (fib) oder glatter (neb) Wolkenschleier, der im allgemeinen Haloerscheinungen hervorruft	fib, neb	du, un	–
As		Grau oder bläulich, streifig, faserig oder einförmig aussehend, die Sonne völlig verdeckend (op), oder stellenweise so dünn, dass die Sonne wie durch Mattglas (tr) erkennbar ist	–	tr, op, du, un, ra	vir, pra, pan, mam
Ns		Grau, häufig dunkle, die Sonne völlig verdeckende Wolke, die bei mehr oder weniger anhaltendem, meist den Erdboden erreichendem Niederschlag diffus aussieht; unterhalb des Ns oft pannus-Wolken, die mit ihrer Untergrenze zusammenwachsen können	–	–	pra, vir, pan
St		Durchgehend grau, ziemlich einförmige Untergrenze, aus der Sprühregen, Schneegriesel oder Eisnadeln fallen können	neb, fra	op, tr, un	pra
Cc	Flecken, Felder oder Schichten von Wolken	Dünn, weiß, aus sehr kleinen, körnig gerippten o.ä., miteinander verwachsenden, oder isolierte Wolkenteile ohne Eigenschatten, mehr oder weniger regelmäßig angeordnet mit meist einer scheinbaren Breite von weniger als 1°	str, len, cas, flo	un, la	vir, mam
Ac		Weiß und/oder grau, im allgemeinen mit Eigenschatten, aus schuppenartigen Teilen, Ballen, Walzen usw. bestehend, die manchmal teilweise faserig oder diffus aussehen und zusammengewachsen sein können; die meisten kleineren, regelmäßig angeordneten Wolkenteile haben eine scheinbare Breite von 1 - 5°	str, len, cas, flo	tr, pe, op, du, un, ra, la	vir, mam
Sc		Grau, und/oder weißlich mit fast immer dunklen Stellen, aus mosaikartigen nicht faserigen Schollen, Ballen, Walzen usw. bestehend, die zusammengewachsen sein können; die meisten kleineren, regelmäßig angeordneten Wolkenteile haben eine scheinbare Breite von > 5°	str, len, cas	tr, pe, op, du, un, ra, la	mam, vir, pra
Cu	isolierte Wolke, vertikal aufquellend	Durchweg dicht und scharf abgegrenzt, die sich in der Vertikalen in Form von Hügeln, Kuppeln oder Türmen entwickelt, deren aufquellender oberer Teil oft wie Blumenkohl aussieht und deren Untergrenze verhältnismäßig dunkel ist und fast horizontal verläuft; die von der Sonne beschienenen Teile sind leuchtend weiß; manchmal sind Cu auch zerfetzt	fra, hum, med, con	ra	pil, vel, vir, pra, arc, pan, tub
Cb		Massig, dicht, von beträchtlicher vertikaler Ausdehnung, in Form eines hohen Berges oder mächtigen Turmes; zumindest teilweise weist der obere Wolkenabschnitt glatte Formen auf, oder ist faserig bzw. streifig und stets abgeflacht; unterhalb des Cb oft pannus-Wolken, die mit der Untergrenze zusammengewachsen sein können	cal, cap	–	pra, vir, pan, inc, mam, pil, vel, arc, tub
Ci	Isolierte Wolken, faserig, haarähnlich, in Form weißer, zarter Fäden, oder weißer bzw. überwiegend weißer Flecken oder schmaler Bänder, oft seidiger Schimmer; Einzelwolke größer als 1°		fib, unc, spi, cas, flo	in, ra, ve, du	mam

WMO-Wolkenklassifikation (Tab. 29)

Gattung räumliche Verteilung der Wolke, Art ihrer Elemente	Art Eigenarten in der Gestalt der Wolke			Unterart Anordnung der Wolkenteile und Lichtdurch- lässigkeit der Wolke			Sonderform/Begleitwolke		
Cirrus (Ci) isolierte Wolken, zarte Fäden, dichtere Flecken, weiß, faserig, seidiger Glanz	fibratus	faserig	fib	intortus	verflochten	in	mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
	uncinus	haken-, krallenförmig	unc	radiatus	strahlenförmig	ra			
	spissatus	dicht	spi	vertebratus	grätenförmig	ve			
	castellanus	türmchenförmig	cas	dup licatus	doppelschichtig	du			
	floccus	flockenförmig	flo						
Cirrocumulus (Cc) Flecken, Felder, Schich- ten, weiß, körnigerippelt	stratiformis	schichtförmig	str	undulatus	wogenförmig	un	virga	mit Fallstreifen	vir
	lenticularis	linsen-, mandelförmig	len	lacunosus	durchlöchert	la	mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
	castellanus	türmchenförmig	cas						
	floccus	flockenförmig	flo						
Cirrostratus (Cs) weißlicher Schleier, faserig oder glatt	fibratus	faserig	fib	dup licatus	doppelschichtig	du	keine		
	nebulosus	nebelartig	neb	undulatus	wogenförmig	un	keine		
Alto cumulus (Ac) weißliche bis graue Flecken, Felder, Schich- ten, mosaikartig, wogen- förmig, Eigenschatten	stratiformis	schichtförmig	str	translucidus	durchscheinend	tr	virga	mit Fallstreifen	vir
	lenticularis	linsen-, mandelförmig	len	perlucidus	durchsichtig (Lücken)	pe	mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
	castellanus	türmchenförmig	cas	opacus	nicht durchscheinend	op			
	floccus	flockenförmig	flo	dup licatus	doppelschichtig	du			
				undulatus	wogenförmig	un			
				radiatus	strahlenförmig	ra			
Altostratus (As) blaugraue, einförmige Schicht, Wolkenbasis im mittelhohen Stockwerk	keine			translucidus	durchscheinend	tr	virga	mit Fallstreifen	vir
	keine			opacus	nicht durchscheinend	op	praecipitatio	mit Niederschlag	pra
	keine			duplicatus	doppelschichtig	du	pannus	mit Fetzen	pan
	keine			undulatus	wogenförmig	un	mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
	keine			radiatus	strahlenförmig	ra			
Nimbostratus (Ns) graue bis dunkle Schicht, Wolkenbasis im tiefen Stockwerk	keine			keine			praecipitatio	mit Niederschlag	pra
	keine			keine			virga	mit Fallstreifen	vir
	keine			keine			pannus	mit Fetzen	pan
Stratocumulus (Sc) graue, teils weißliche Flecken, Felder, Schich- ten, mosaikartig, wogen- förmig, Eigenschatten	stratiformis	schichtförmig	str	translucidus	durchscheinend	tr	mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
	lenticularis	linsen-, mandelförmig	len	perlucidus	durchsichtig (Lücken)	pe	virga	mit Fallstreifen	vir
	castellanus	türmchenförmig	cas	opacus	nicht durchscheinend	op	praecipitatio	mit Niederschlag	pra
				duplicatus	doppelschichtig	du			
				undulatus	wogenförmig	un			
				radiatus	strahlenförmig	ra			
Stratus (St) durchweg graue, ein- förmige Schicht mit tiefer Wolkenbasis	nebulosus	nebelartig	neb	opacus	nicht durchscheinend	op	praecipitatio	mit Niederschlag	pra
	fractus	zerrissen	fra	translucidus	durchscheinend	tr			
				undulatus	wogenförmig	un			
Cumulus (Cu) Einzelwolke mit Ver- tikalentwicklung, bei scharfen Rändern glänzend weiß, teils blu- menkohllartige Gipfel	humilis	wenig entwickelt	hum	radiatus	strahlenförmig	ra	pileus	mit Kappe	pil
	mediocris	mittelmäßig entwickelt	med				velum	mit Schleier	vel
	congestus	mächtig aufquellend	con				virga	mit Fallstreifen	vir
	fractus	zerrissen	fra				praecipitatio	mit Niederschlag	pra
							arcus	mit Böenkragen	arc
							pannus	mit Fetzen	pan
							tuba	mit Wolkenschlauch	tub
Cumulonimbus (Cb) vertikal sehr mächtige Wolke, Ränder schlierig, streifig; Gipfel glatt oder ausgefranst, gelegentlich ambossförmig; Basis dunkel, drohend aussehend	calvus	kahl (nicht faserig)	cal				praecipitatio	mit Niederschlag	pra
	capillatus	behaart (faserig)	cap				virga	mit Fallstreifen	vir
							pannus	mit Fetzen	pan
							incus	mit Amboss	inc
				keine			mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen	mam
				keine			pileus	mit Kappe	pil
				keine			velum	mit Schleier	vel
				keine			arcus	mit Böenkragen	arc
				keine			tuba	mit Wolkenschlauch	tub

2. Wolkenbildung und -auflösung

2.1 Wolkenbildungsprozesse

Beobachtet man tagsüber aufmerksam das Himmelsbild, so stellt man fest, dass Wolken ständigen Veränderungen unterworfen sind. Besonders Cumulus zeigt zeitlich relativ rasch fortschreitende Entwicklungsvorgänge, während Cirrus nur langsam sein Aussehen wechselt. Eine Wolke darf deshalb nicht als eine in der Strömung driftende, unvergängliche troposphärische Erscheinung aufgefasst werden, sondern sie ist das Produkt einer Vielzahl von komplexen physikalischen und rückkoppelnden Prozessen (s. 2.4.4). Überwiegen die wolkenformenden Vorgänge, entwickelt sie sich und gewinnen rückbildende Prozesse die Oberhand, beginnt sie sich aufzulösen.

Ein Beispiel dafür ist das wesentliche dynamische, makrophysikalische Merkmal der Wolkenbildung, der Aufwindstrom (Hebungsprozess) der Luft, der durch adiabatische Abkühlung zur Kondensation des überschüssigen Wasserdampfes führt. Gleichzeitig jedoch wirkt - besonders bei Quellwolken - das Entrainment (s. 2.2.1.1.2), das eine ständige Durchmischung der Randbereiche mit ihrer Umgebungsluft verursacht und dadurch wolkenauflösend agiert, weil es den Auftrieb der Luft schwächt, den Flüssigwassergehalt reduziert, vertikale und horizontale Impulse vermischt und das Partikelspektrum der Wolke in einer Art und Weise beeinflusst, die noch nicht restlos geklärt ist. Solange wie Hebungs Vorgänge vorhanden sind, kann der Verlust an Flüssigwasser infolge Entrainment und Niederschlag durch die ständige Kondensation des Wasserdampfes ausgeglichen werden. Kommen sie dagegen dagegen zum Erliegen, beginnt sich die Wolke aufzulösen.

Wolken entstehen durch Kondensation oder Sublimation des übersättigten Wasserdampfes auf geeigneten Aerosolpartikeln. Der hauptsächliche Vorgang ist der Kondensationsprozess, der bereits bei einer Übersättigung des Wasserdampfes von maximal 1 % auf den Wolkenkondensationskernen (CCN, Cloud condensation nucleus) erfolgt. Diese Teilchen bilden sich zum größten Teil innerhalb der planetarischen Grenzschicht durch Gas-Partikelreaktionen und stammen nicht von einer direkten Oberflächenquelle.

Die zur Wolkenbildung notwendige Wasserdampfübersättigung wird erzeugt durch – Zunahme des Wasserdampfes durch Verdunstung,

- Abkühlung unter den Tau- oder Reifpunkt infolge
 - diabatische Abkühlung,
 - Wärmeabgabe an eine kältere Umgebung,
 - Ausstrahlung an Dunstschichten,
 - adiabatische Abkühlung und
- Kombination dieser Prozesse.

2.1.1 Wasserdampfzunahme durch Verdunstung

Ähnlich wie Seerauch durch Verdunstung von warmen Wasseroberflächen in kalte Luft entsteht, bilden sich Wolken, wenn wärmerer Niederschlag aus höheren Luftschichten in eine kältere, tiefere Schicht fällt und verdunstet. Dieser Vorgänge lassen besonders im Winter beobachten, wenn Warmluft gehoben wird und sich unter ihr am Boden eine Kaltluftschicht befindet, bzw. wenn es in der Höhe unterhalb der Frontalzone durch Verdunstung des Regens zur Übersättigung kommt.

Verdunstungswolken (Tab. 30)

Nimbostratus	Altostratus kann mit einsetzendem Niederschlag sehr rasch nach unten zu Nimbostratus anwachsen
pannus	in Verbindung mit Reibungsturbulenz bilden sich in der Reibungsschicht Schlechtwetterfetzen (pannus) aus, bei deren Entstehung aber die adiabatische Abkühlung infolge der Reibungsturbulenz eine Rolle spielt.

2.1.2 Abkühlung der Luft unter den Taupunkt bzw. Reifpunkt

Wird die Luft diabatisch oder adiabatisch unter den Taupunkt oder Reifpunkt abgekühlt, bilden sich ebenfalls Wolken.

Diabatische und adiabatische Prozesse (Tab. 31)

Diabatischer Prozess	Thermodynamischer Vorgang, der zu einer Zu- oder Abnahme der Wärmeenergie von Luft führt	Latente Wärme
		Molekulare und turbulente Wärmeleitung
		Thermische Konvektion
		Emission und Absorption von Strahlung
Adiabatischer Prozess	Thermodynamischer Vorgang, bei dem einem Luftpaket weder Wärme von außen zugeführt noch Wärme nach außen entzogen wird	Bei Vertikalbewegungen durch Volumenänderung adiabatische Abkühlung oder adiabatische Erwärmung

2.1.2.1 Diabatische Abkühlung

Diabatische Abkühlungsprozesse treten in der bodennahen Luftschicht und an Dunstobergrenzen auf.

Wird in der bodennahen Luftschicht Wärme an eine kältere Erdoberfläche abgegeben, entsteht Strahlungs- und Advektionsnebel oder -stratus (s. 3.1.1 und 2.2.2.1).

Aber auch durch die Abkühlung von Dunstschichten, die zu allen Tageszeiten Wärme in höhere kalte Schichten und in den Weltraum abstrahlen, kann Wasserdampfübersättigung erreicht werden. Dies ist besonders nachts der Fall, wenn die kurzwellige Sonneneinstrahlung fehlt. Dadurch kühlt sich die Inversion von oben her ab und es entsteht anfangs eine ausgedehnte Wolkenschicht des räumlichen Verteilungsmerkmals Stratus, die keine wesentlichen Helligkeitsunterschiede und Konturen aufweist und den Gattungen Stratus, Altostratus und Cirrostratus zugeordnet wird.

Die andauernde Strahlungsabkühlung an der Obergrenze dieser Wolken bewirkt eine weitere Zunahme des vertikalen Temperaturgradienten und damit eine Labilisierung der thermischen Schichtung, so dass schwache konvektive Umlagerungen einsetzen. Die zusammenhängende einförmige Wolkenschicht zerfällt deshalb in viele kleine, einzelne Schollen oder sie ist in ihrer vertikalen Ausdehnung unterschiedlich dick, so dass markante Helligkeitsunterschiede erkennbar sind. Diese Wolke zählt nun zum Stratocumulus-Merkmal, und auf diese Art und Weise können sich Wolken der Gattungen Stratocumulus, Altocumulus und Cirrocumulus mit der Art stratiformis bilden (s. 2.2.2.2).

2.1.2.2 Adiabatische Abkühlung

Der überwiegende Teil der Wolken in der Troposphäre entsteht durch die relativ kräftige adiabatische Abkühlung, die bei Hebungsprozessen stattfindet. Die Temperatur von feuchter Luft nimmt dabei um 1 K und der Taupunkt um etwa 0.2 K ab, so dass die Taupunktdifferenz um 0.8 K/100 m bzw. um 1 K pro 125 m geringer wird.

Bei ausreichender Anfangsfeuchte wird damit ein Niveau erreicht, im dem der Taupunkt genau so groß ist wie die Temperatur, so dass bei weiterem Aufsteigen der Luft der überschüssige Wasserdampf zu Wolkentropfchen kondensiert.

Vorgänge, die zu einer adiabatischen Abkühlung führen, sind

- Turbulenz in der planetarischen Grenzschicht, an Inversionen und im Strahlstrombereich,
- orographische Hebung auf der Luvseite (Stau),
- langsame, großräumige Hebungsvorgänge oder Aufgleiten,
- atmosphärische Wellen (Leewellen, Wellen an Inversionen) und
- Konvektion.

2.1.2.2.1 Turbulenz

Unter dem Begriff Turbulenz versteht man ungeordnete oder geordnete Luftbewegungen in Form von Wirbeln, Walzen oder Wellen, die der Grundströmung überlagert sind und aus Abweichungen vom zeitlich und räumlich gemittelten Grundzustand bestehen.

Turbulenz : Ungeordnete oder geordnete Luftbewegungen in Form von Wirbeln, Walzen oder Wellen, die der Grundströmung überlagert sind und aus Abweichungen vom zeitlich und räumlich gemittelten Grundzustand bestehen.

Atmosphärische Turbulenz kommt dreidimensional zufällig, also nicht vorausberechenbar, an einem bestimmten Ort in der Atmosphäre zu einer bestimmten Zeit vor und tritt in Form von geordneten und ungeordneten Wirbeln, Walzen oder Wellen, den Turbulenzkörpern, auf, die sich der mittleren Strömung überlagern.

Innerhalb der Atmosphäre besteht eine außerordentlich hohe Anzahl gleichzeitig existierender, jedoch unterschiedlich großer Turbulenzkörper, die vor allem in der planetarischen Grenzschicht und in der freien Atmosphäre oberhalb 6 km Höhe im Bereich der Strahlströme, aber auch an Inversionen zu finden sind.

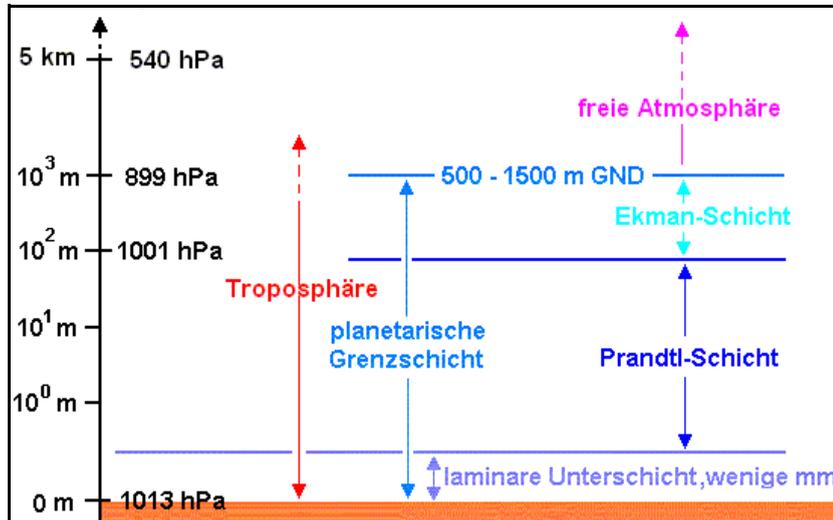
Turbulenz verursacht einen verstärkten Austausch und damit Ausgleich der unterschiedlichen Eigenschaften der Luft durch den Transport von Impuls, Wärme, Wasserdampf oder Immissionsstoffen in Richtung des entsprechenden Gefälles und proportional zu dessen Stärke.

2.1.2.2.1.1 Turbulenz in der planetarischen Grenzschicht

In der Atmosphäre entsteht Turbulenz überwiegend in der planetarischen Grenzschicht oder Reibungsschicht zwischen dem Erdboden und einer Höhe von etwa 500 bis 1500 m agl.

Die Reibungsschicht befindet sich grundsätzlich - abgesehen von der millimeterdicken laminaren Unterschicht - in einem turbulenten Strömungszustand, da hier Turbulenzen durch Windscherungen und Strömungshindernisse ausgelöst werden.

Aufbau der planetarischen Grenzschicht (Abb. 3)



Prandtl-Schicht : Die Dicke dieser Schicht beträgt etwa 10% der Gesamthöhe der planetaren Grenz- oder Reibungsschicht und ihre Obergrenze liegt in einigen Dekametern bis maximal 100 m über Grund. Die Strömung in der Prandtl-Schicht ist turbulent. Dadurch werden Impuls, Wärmeenergie und Wasserdampf transportiert, und das überwiegend durch die thermische Schichtung und Bodenrauigkeit geprägte Windprofil sowie die anderen meteorologischen Größen zeigen mit der Höhe einen annähernd logarithmischen Verlauf. An der Obergrenze der Prandtl-Schicht erreicht der Betrag der Windgeschwindigkeit bereits Werte von etwa 70 - 80 % der reibungsfreien Strömung.

Ekman-Schicht : In der Ekman-Schicht findet die gesamte Drehung des Windes von der Richtung des Bodenwindes in die des Gradientwindes statt. In dieser Schicht treten im allgemeinen die höchsten Windgeschwindigkeiten der planetarischen Grenzschicht auf.

Bei stärkerer Turbulenz stellt sich in der turbulenten Luftschicht eine annähernd mittlere potentielle Temperatur ein, so dass die t/p -Zustandskurve im TEMP nahezu trockenadiabatisch verläuft. Auch der Wasserdampf wird etwa gleichmäßig in der Durchmischungsschicht verteilt, so dass sich ein mittleres, mit der Höhe annähernd konstantes Mischungsverhältnis ergibt.

In den unteren Schichten kommt es dabei zu einer Erwärmung und Wasserdampfabnahme, in der Höhe dagegen nimmt der Feuchtegehalt zu und die Temperatur ab. Im Niveau des Schnittpunktes von mittlerer Trockenadiabate und mittlerem Mischungsverhältnis - Mischungskondensationsniveau MKN genannt -, herrscht Wasserdampfsättigung.

Oberhalb des MKN hat sich damit eine Wolke gebildet, die ziemlich einheitlich grau aussieht und bis zur sogenannten Turbulenz-Inversion reicht, die aufgrund der im oberen Teil der Durchmischungsschicht stattfindenden Abkühlung entstanden ist.

Dieser Turbulenz-Status formt sich besonders dann, wenn der kondensierende Wasserdampf ständig durch zusätzliche Verdunstung von Wasser ersetzt werden kann.

Begünstigt tritt Turbulenz-Stratus deshalb über dem Meer oder über feuchtem Erdboden (nach dem Regen), aber auch in Warmluftmassen auf, die von unten abgekühlt werden. Warmluft, die über kaltes Wasser bzw. im Winter über kalte Landflächen geführt wird, zeigt daher häufig ausgedehnte Stratusfelder. In beiden Fällen sinkt das MKN und damit die Stratusuntergrenze mit zunehmender Abkühlung ab (s. 2.2.2.1.1).

Auch Tauwetter, das in mittleren Breiten im Winter oder auch in der Übergangsjahreszeit in den Polargebieten vorkommen kann, verursacht eine Abkühlung der Luft durch den latenten Wärmeentzug beim Schmelzprozess von Schnee. In diesen Gebieten lässt sich dann verbreitet Nebel oder Hochnebel beobachten.

Ist Bodennebel vorhanden, kann es durch auffrischenden Wind und damit einsetzender Turbulenz durch die eben geschilderten Vorgänge zu einer restlosen Nebelauflösung kommen, bzw. der Nebel löst sich nur in unmittelbarer Bodennähe auf, so dass Stratus entstanden ist.

Findet nachts eine stärkere IR-Abstrahlung an der Obergrenze des Stratus statt, so verursacht diese eine zusätzliche Abkühlung, so dass sich das vertikale Temperaturgefälle vergrößert. Die damit verbundene Labilisierung kann zu konvektiven Umlagerungen und zu einer Umwandlung des Stratus in Stratocumulus führen (s. 2.1.2.1 und 2.2.2.2).

2.1.2.2.1.2 Turbulenz an Inversionen und im Strahlstrombereich

Die an Inversionen und in der Nähe von Jetstreams vorhandenen vertikalen Windscherungen verursachen Turbulenz und können bei starker Ausprägung und ausreichendem Wasserdampfgehalt auch zur Wolkenbildung führen.

Im Strahlstrombereich kann sich dadurch Cirrus floccus, fibratus und uncinus und an Inversionen der mittleren Troposphäre Altocumulus floccus bilden.

2.1.2.2.2 Orographische Hebung auf der Luvseite (Stau)

Wird ein horizontal großräumiges Hindernis wie z.B. die Alpen angeströmt, dann wird die Luft luvseitig gehoben und sinkt auf der Leeseite ab. Ob dabei auf der Luvseite Wolkenbildung auftritt, hängt von der Höhe der Barriere und dem Feuchtegehalt der herangeführten Luftmasse ab.

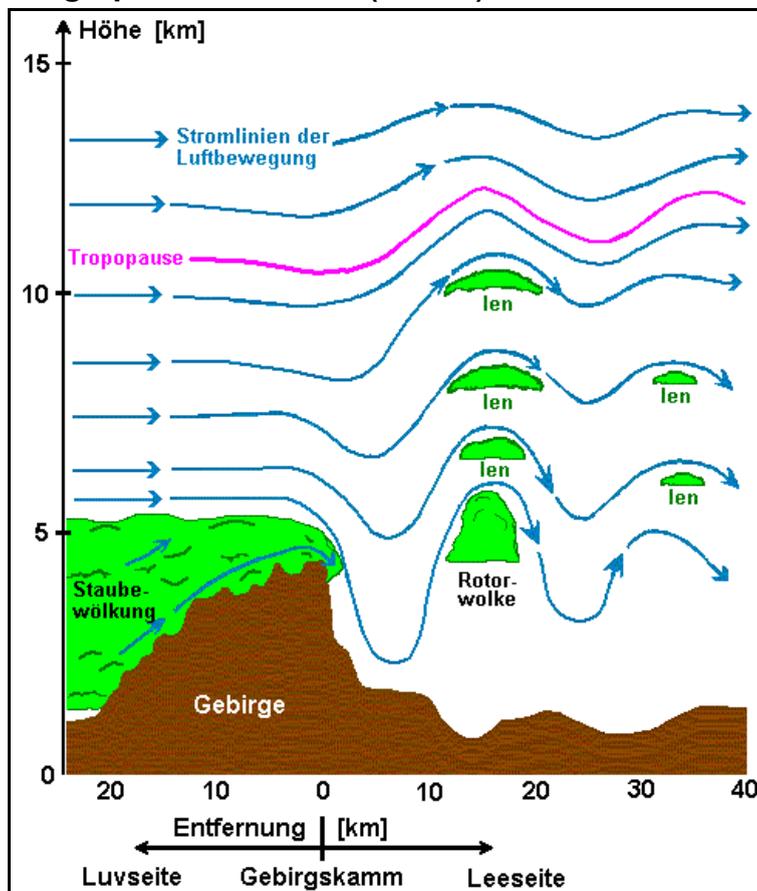
Ist der Wasserdampfgehalt der gehobenen Luft hoch und damit die Taupunktdifferenz gering, können auch bereits an kleinen Hindernissen Wolken entstehen.

Bei stabiler Schichtung der das Hindernis überströmenden Luft entwickeln sich stratiforme Wolken in einzelnen oder zusammenhängenden Schichten und es kann zu anhaltenden Niederschlägen kommen.

Bei bedingt oder potentiell labiler Schichtung bilden sich ebenfalls ausgedehnte Wolkenfelder, die durch eingelagerte Quellwolken - embd Cu oder Cb - gekennzeichnet sind, welche die Schichtwolkenobergrenze durchstoßen und so als Quellformen für Piloten sichtbar werden. Der geschulte Bodenbeobachter kann embd Cb an den raschen räumlichen und zeitlichen Intensitätsschwankungen der fallenden Niederschläge sowie an Niederschlagsformen und Wettererscheinungen erkennen, die nur an den Cumulonimbus gebunden sind.

Die Niederschläge von ausgeprägter der Staubewölkung sind im allgemeinen intensiver und von längerer Dauer als die bei Aufgleitprozessen (s. 2.1.2.2.3).

Orographische Wolken (Abb. 4)



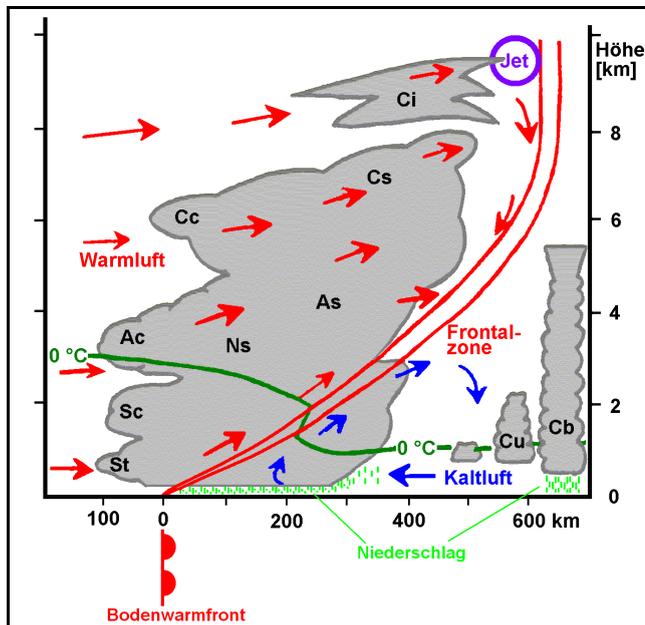
Wird ein horizontal großräumiges Hindernis wie z.B. die Alpen angeströmt, dann wird die Luft luvseitig gehoben und sinkt auf der Leeseite ab. Ist der Wasserdampfgehalt der gehobenen Luft hoch und damit die Taupunktdifferenz gering, können auch bereits an kleinen Hindernissen Wolken entstehen. Bei stabiler Schichtung der das Hindernis überströmenden Luft entwickeln sich stratiforme Wolken in einzelnen oder zusammenhängenden Schichten und es kann zu anhaltenden Niederschlägen kommen. Bei bedingt oder potentiell labiler Schichtung bilden sich ebenfalls ausgedehnte Wolkenfelder, die durch eingelagerte Quellwolken - embd Cu oder Cb - gekennzeichnet sind, welche die Schichtwolkenobergrenze durchstoßen und so als Quellformen für Piloten sichtbar werden. Weiterhin lassen sich leeseitig häufig sogenannte Gravitationswellen beobachten, die unter dem Einfluss der Schwerkraft an einer troposphärischen Übergangszone, einer Inversion oder Isothermie, entstehen. Das Gebirge bildet dabei die Störungsquelle der Luftströmung und aufgrund der Gravitationskraft kommt es dann bei stabiler Schichtung der Atmosphäre zur Ausbildung von leeseitigen Schwingungen,

die physikalisch als stehende Wellen zu betrachten sind und von Segelfliegern als Leewellen bezeichnet werden. Bei ausreichender Luftfeuchte können sich auf der Vorderseite eines Wellenberges Wolken der Gattung Sc, Ac und Cc ausbilden, die oft eine linsenartige Form aufweisen.

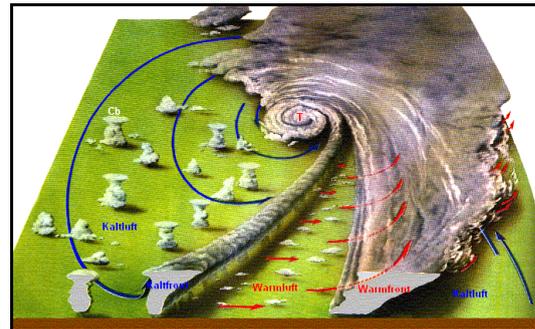
2.1.2.2.3 Großräumige troposphärische Hebungsprozesse

Großräumige troposphärische Hebungsprozesse werden auch als 'Aufgleiten' bezeichnet und kennzeichnen die bei stabiler Schichtung und Vertikalbewegungen in der Größenordnung von cm/s über mehrere 100 Kilometer in der Breite und in der Länge von einigen 100 bis einigen 1000 km großflächige adiabatische Abkühlung. Solche Hebungsprozesse finden in mittleren Breiten überwiegend an den Fronten der Tiefdruckgebiete statt und zur Aufgleitbewölkung zählen Ci, Cs, As und Ns.

Schematisches Wolkenbild einer Warmfront (Abb. 5a und 5 b)



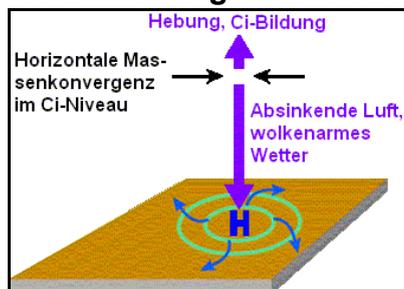
Die Abbildung 5a) gibt als troposphärischen Querschnitt die Schichtwolkenverhältnisse im Bereich einer gut ausgeprägten Warmfront wieder. Die Pfeile zeigen die Relativbewegung der Warm- (rot) und Kaltluft (blau) und das sich durch die Hebungsvorgänge entwickelnde Wolken-system. Die beiden roten Linien markieren die thermische Frontalzone, also den Übergangsbereich zwischen der Warmluft links und der Kaltluftmasse rechts.



Tiefdruckgebiet der mittleren Breiten mit seinen Tiefausläufern und der frontalen Bewölkung

Zeigt die Wetterkarte eine ausgeprägte Höhenkonvergenz, so führen die Absinkbewegungen der Luft unterhalb dieser Vergenz häufig zu einer ausgesprochenen Wolkenarmut in der mittleren Troposphäre. Oberhalb der Höhenkonvergenz sind in der hohen Troposphäre dagegen Hebungsvorgänge vorhanden, so dass solche Hochdrucklagen bei ausreichender Luftfeuchte durch markante Cirrusbewölkung gekennzeichnet sind.

Höhenkonvergenz und Ci-Bildung (Abb. 6)



2.1.2.2.4 Atmosphärische Wellen und Rotoren

2.1.2.2.4.1 Leewellen

Auf der Leeseite von einzelnen Bergen oder Gebirgszügen lassen sich häufig weltweit sogenannte Gravitations- oder Schwerewellen beobachten, die unter dem Einfluss der Schwerkraft an einer troposphärischen Übergangszone, einer Inversion oder Isothermie, entstehen. Das Gebirge bildet dabei die Störungsquelle der Luftströmung und aufgrund der Gravitationskraft kommt es dann bei stabiler Schichtung der Atmosphäre zur Ausbildung von leeseitigen Schwingungen, die physikalisch als stehende Wellen zu betrachten sind und von Segelfliegern als Leewellen bezeichnet werden (s. Abb. 4).

Die Wellenlänge beträgt in der Regel 5 bis 25 km, liegt in der Mehrzahl der Fälle bei 10 km und es lassen sich leeseitig 2 bis 3, manchmal sogar 5 bis 7 Wellenberge registrieren. Grundsätzlich gilt, dass die Wellenlänge mit der Windgeschwindigkeit zunimmt und mit abnehmender Stabilität geringer wird.

Die Amplitude der Welle wächst im allgemeinen mit zunehmender Entfernung vom Erdboden an, erreicht ein Maximum in der mittleren Troposphäre, nimmt dann wieder ab und geht vorwiegend unterhalb der Tropopause gegen null.

In Ausnahmefällen jedoch - meist durch Hochgebirge verursacht - werden bei kräftigem Wind Leewellen ausgelöst, deren Amplitude so groß ist, dass nicht nur die Troposphäre, sondern auch noch die Stratosphäre von diesen dynamischen Vorgängen erfasst wird.

Bei ausreichender Luftfeuchte können sich auf der Vorderseite eines Wellenberges Wolken der Gattung Sc, Ac und Cc ausbilden (s. 2.2.2.2.5).

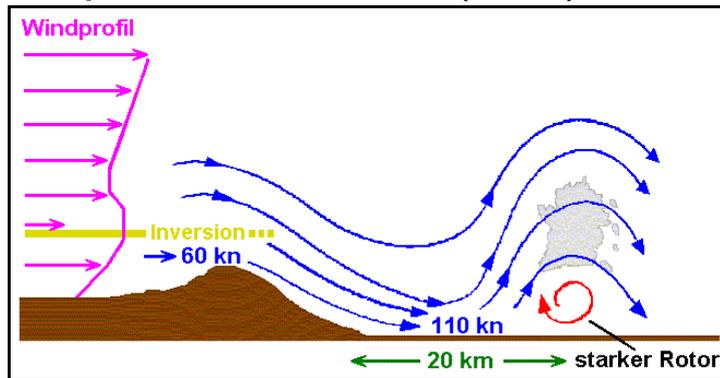
2.1.2.2.4.2 Rotoren

Unter dem Begriff 'Rotoren' versteht man walzenförmige Luftwirbel mit horizontaler, gebirgsparalleler Achse, die sich hauptsächlich auf der Leeseite in tieferen Luftschichten unter den Wellenbergen ausbilden (s. Abb. 4, 5 und Wolkenatlas S. 200, 211).

Der stärkste Rotor tritt normalerweise unmittelbar auf der Abwindseite des Gebirges unter dem ersten Wellenberg auf.

Windprofil mit starkem Rotor (Abb. 7)

Quelle : [8]



Durch die wogenförmigen Strömungsverhältnisse kommt es unter dem Wellental zu einer Drängung der Stromlinien mit höheren und unter dem Wellenberg zu einer Ausweitung mit geringeren Windgeschwindigkeiten. Nach der Gleichung von Bernoulli muß deshalb der statische Druck unter dem Wellental sinken und unter dem Wellenberg steigen. Dadurch kann sich das allgemeine Druckgefälle in Bodennähe umkehren und eine gegen die Hauptströmung gerichtete Bodenströmung entstehen, die einen ortsfesten Luftwirbel erzeugt, den Rotor.

Gesetz von Bernoulli (Form. 1)

$$p_{ges} = p_{dyn} + p_{stat} = konst.$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$p_{ges} = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_{stat} = konst.$$

- p_{ges} : Gesamtdruck [$N\ m^{-2}$]
- p_{dyn} : Dynamischer Druck oder Staudruck [$N\ m^{-2}$]
- p_{stat} : Statischer Druck oder Luftdruck [$N\ m^{-2}$]; $p_{stat} = g \rho h$
- ρ : Dichte [$kg\ m^{-3}$] der Luft
- v : Strömungsgeschwindigkeit [$m\ s^{-1}$] der Luft

Nach dem Gesetz von Bernoulli ist die Summe aus dem statischen und dynamischen Druck an jedem Ort für eine Stromlinie konstant (s. Form. 1). Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit größerem dynamischen Druck p_{dyn} (unter dem Wellental) muss daher der statische Druck p_{stat} abnehmen bzw. bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten (unter dem Wellenberg) und deshalb kleinerem p_{dyn} muss p_{stat} ansteigen.

In Verbindung mit diesen Leewirbeln können bei ausreichender Luftfeuchte Rotorwolken vorkommen, die ein cumulusähnliches Aussehen mit einer glatten Oberseite zeigen, aber im Gegensatz zu Quellwolken oft einige Kilometer lang sind.

Ihre Untergrenze befindet sich häufig in Kammhöhe des wellenauslösenden Berghindernisses.

2.1.2.2.4.3 Wellen an Inversionen

Inversionen, die in der gesamten Troposphäre auftreten können, stellen Grenzschichten mit wärmerer Luft oberhalb und kälterer Luft unterhalb dar. Durch innere Reibung (Adhäsionskräfte) und Windscherung kann es an der Grenzfläche zu wellenartigen Schwingungen kommen. Ihre Wellenlängen, die eine Funktion des vertikalen Temperaturgradienten und der Windscherung sind, liegen im allgemeinen um die 400 m und die Amplituden betragen einige zehn bis mehrere hundert Meter.

Wellen an Inversionen werden bei Kondensation des Wasserdampfes als wogenförmige Wolkenstruktur sichtbar (s. 2.2.2.2.4).

2.1.2.2.5 Konvektion

Die von der Erdoberfläche während des Tages absorbierte Globalstrahlung führt zu einer mehr oder minder starken Erwärmung des Untergrundes, der die ihm aufliegende Luftschicht durch molekulare und turbulente Wärmeleitung unterschiedlich stark aufheizt.

Der Wärmeaustausch zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre erfolgt in der laminaren Unterschicht der Bodenluft durch Wärmeleitung und in der darüber liegenden Prandtl-Schicht durch den turbulenten Wärmeaustausch, der wesentlich schneller abläuft als die molekulare Wärmeleitung.

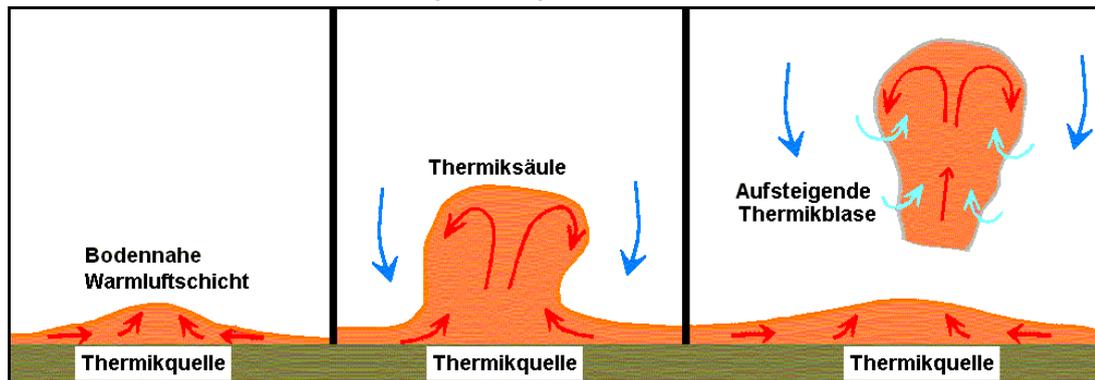
Ist die Erdoberfläche wärmer als die darüber liegende Luft, stellt sich in der Prandtl-Schicht (s. Abb. 3) ein überadiabatischer Temperaturgradient ein. Die damit verbundene Labilität ist die notwendige Voraussetzung für einsetzende Konvektion.

Konvektion : Geordnete vertikale Zirkulationsströmung um eine horizontale Achse. Die am Erdboden erwärmte Luft steigt auf (Thermik), kühlt sich in der Höhe ab und sinkt seitwärts wieder ab.

Die Erwärmung der Luft durch den Erdboden erfolgt nicht gleichmäßig, da seine Temperatur u.a. von der Albedo, der Wärmeleitfähigkeit und der Bodenfeuchte sehr stark beeinflusst wird. Die wärmsten Stellen werden als Thermikquellen bezeichnet, so dass auch die Luft in diesen Gebieten wärmer als ihre Umgebung ist und aufgrund ihrer geringeren Dichte die Neigung verspürt, sich in Form einer Säule vom Erdboden zu lösen. Als eine auf dem Kopf stehende, kegelförmige Warmluftssäule strudelt die Luft danach wie ein Heißluftballon aufwärts. In der Umgebung setzt dann eine Ausgleichströmung ein, die allmählich die Thermiksäule von unten her abschnürt, so dass eine Thermikblase entsteht, die anfangs beschleunigt aufsteigt, bis sie infolge der adiabatischen Abkühlung und Mischung die gleiche Temperatur wie die umgebende Luft aufweist. Die dabei im unteren Bereich der Warmluftssäule stattfindende Durchmischung mit der Umgebungsluft führt zu einer Auftriebsverminderung, so dass sich eine Schleppe weniger warmer Luft mit geringerer Aufstiegs geschwindigkeit ausformt (s. Abb. 8). Nach wenigen Minuten kann sich dann die nächste Warmluftblase ausbilden, die beim Erreichen der Schleppe ihrer Vorgängerin aufgrund des geringeren Stirnwiderstandes schneller aufzusteigen vermag. Zwischen diesen Steiggebieten sinkt die Luft als Ausgleich ab. So eine Folge von Warmluftblasen, die auf diese Weise anfangs beschleunigt aufsteigen, bilden einen konvektiven Aufwindschlauch, der von den Segelfliegern als Thermik bezeichnet wird.

Thermiksäulen und -blasen (Abb. 8)

Quelle : [6]



Eine Warmluftblase setzt sich aus einer Kappe und einer Schleppe zusammen. Die Kappe stellt ihre Obergrenze dar und enthält die wärmste Luft, so dass sie den stärksten Temperaturgradienten zur Umgebungsluft und die höchste Auftriebskraft aufweist. Die Auftriebskraft der Schleppe dagegen ist aufgrund der ständigen Durchmischung der Thermikblasenränder mit ihrer Umgebungsluft (Entrainment; s. 2.2.1.1.2) geringer. Das Entrainment verursacht eine zunehmende Verminderung der Kappengröße und einen ständige Zunahme des Umfangs der Schleppe während des Aufstieges.

Nachdem die Thermikblase eine Höhe erreicht hat, die etwa ihrem ein- bis zweifachen Durchmesser entspricht, ist ihre Auftriebskraft erschöpft. Neue und umfangreichere Thermikblasen bilden sich durch die Vereinigung von Schleppen kleinerer Luftkörper, so dass allgemein gilt, je größer der Höhengewinn einer Thermikblase ausfällt, desto voluminöser ist sie, aber desto geringer ist ihr Temperaturkontrast zur Umgebungsluft.

Die Entwicklung der Thermik beginnt in einer flachen, bodennahen Heißluftschicht, der sogenannten überadiabatischen Schicht, deren vertikaler Temperaturgradient bis zu 10 K/100 m betragen kann. Hat die Sonne eine Höhe von ca. 10° erreicht, so nimmt die Dicke und der Labilitätsgrad der überadiabatischen Schicht bis zu einem Sonnenstand von 30° schnell zu. Von diesem Zeitpunkt an vergrößert sich zwar noch der vertikale Temperaturgradient, jedoch nicht mehr die Schichtdicke, da die Konvektion so stark geworden ist, dass die Bodenwärme nun größtenteils in höhere Schichten abtransportiert wird.

Die Dicke und der Instabilitätsgrad der überadiabatischen Schicht wird von der Intensität der Einstrahlung, der Low-Level-Turbulenz und der Art des Untergrundes bestimmt. Über Wüstengebieten können mehrere 1000 ft starke überadiabatische Luftschichten entstehen, in maritimen Gegenden sind jedoch nur Schichtdicken von einigen 100 ft wahrscheinlich. Die Stärke der Vertikalbewegungen ist dabei hauptsächlich von der Schichtdicke und der Größe des vertikalen Temperaturgradienten, also dem Instabilitätsgrad, abhängig.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Verteilung der Thermik haben

- der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung zum Gelände (Hangthermik),
- die Anströmrichtung des Windes zu Hindernissen,
- örtliche Zirkulationen wie z.B. Land- und Seewind, Berg- und Talwind und
- reibungsbedingte Bodenkonvergenzen/-divergenzen, wie z.B. die Küstenkonvergenz.

Kühlt sich die aufsteigende Thermikluft unter den Taupunkt ab, so entstehen Konvektionswolken, die sich in die drei Klassen

- ormaler (vergenzfreier) Konvektionstyp,
- divergenter Konvektionstyp und
- konvergenter Konvektionstyp.

einteilen lassen.

Aber nicht nur durch Bodenkonvektion, sondern auch an Inversionen können in dünnen labilen Luftschichten konvektive Wolken entstehen (s. 2.1.2.1, diabatische Abkühlung).

Konvektionswolken (Tab. 32)

Bodenkonvektion	normaler oder vergenzfreier Konvektionstyp	Konvektion reicht nur wenige Kilometer hoch, so dass die Temperatur an der Wolkenobergrenze nicht zur Eiskristallbildung genügt; es entsteht meist Cu con, aus dem in unseren Breiten selten ein Schauer fällt
	divergenter Konvektionstyp	Bodendivergenz und entsprechendes Absinken führen zu einem vertikalen Schrumpfen der Luft und damit zur Stabilisierung; die sich dabei häufig ausbildende Absinkinversion begrenzt die vertikale Entwicklung von Quellwolken, so dass sich meist nur Cu hum und med ausbilden; bei hohen Feuchtwerten unterhalb der Absinkinversion, besonders häufig über See, breiten sich die Quellwolken aus und es entsteht Stratocumulus cumulogenitus
	konvergenter Konvektionstyp	bei bodennaher Konvergenz und der daraus resultierenden Hebung wird die Luftsäule vertikal gestreckt und damit hochreichend - in Extremfällen bis zur Tropopause - labilisiert, so dass sich Cu con und Cb bilden
Konvektion in dünnen labilen Luftschichten an Inversionen		Inversionswolken der Wolkengattungen Sc, Ac und Cc der Art stratiformis, die aus Schollen, Ballen oder Walzen bestehen und meist durchscheinend (translucidus) sind oder Lücken (perlucidus) aufweisen, gehören zu den Konvektionswolken; die Labilisierung erfolgt durch Strahlungsabkühlung von Dunst- oder Wolkenschichten an Inversionen (s. diabatische Abkühlung); diese Strahlungsabkühlung kann - ähnlich wie in dünnen, instabilen Wasserschichten - zu einer zellularen Konvektion in Form von regelmäßigen angeordneten polygonalen (vieleckigen) Konvektionszellen führen; bei kräftigem Wind richten sich die Konvektionszellen parallel zur Strömungsrichtung aus und nehmen oft Walzenform an; diese Konvektionsart hat nachts und am frühen Morgen ein Häufigkeitsmaximum und kommt tagsüber durch die Einstrahlung und der damit verbundenen Stabilisierung wieder zum Erliegen, so dass sich diese Wolken mit steigendem Sonnenstand oft allmählich wieder auflösen

2.2 Entstehung einiger Wolkengattungen

2.2.1 Cumuliforme Wolken

Besonders Quellwolken werden ständig in ihrem Inneren und an ihren Rändern mit ihrer Umgebungsluft durchmischt. Dieser Vorgang, 'Entrainment' genannt, schwächt den Auftrieb, reduziert den Flüssigwassergehalt von Wolken, mischt vertikale und horizontale Impulse und beeinflusst das Partikelspektrum der Wolke in einer Art und Weise, die noch nicht restlos geklärt ist.

Solange wie Aufwinde vorhanden sind, wird ständig vor dem Verlust durch Entrainment und Niederschlag Flüssigwasser produziert; lassen die Aufwinde nach, so dass der Nachschub an Wasserdampf unzureichend ist, beginnt sich die Wolke aufzulösen.

Cumuliforme Wolken (Tab. 33)

Troposphärische Höhe	Gattung	Art	Unterart	Sonderform
Tiefes Stockwerk	Cu	fra, hum, med, con	ra	pra
	Cb	cal, cap	–	inc, pra
Mittleres Stockwerk	Ac	cas, flo	*	vir
(Hohes Stockwerk)	Cc	cas, flo	*	vir
	Ci			–

Die Klassifikation ist nicht vollständig.

(...) : Sehr selten

– : Im allgemeinen nicht auftretend

* : In der Wolkenklassifikation vorhanden, aber nicht in dieser Tabelle, weil hier ohne Bedeutung

2.2.1.1 Cumuluswolken

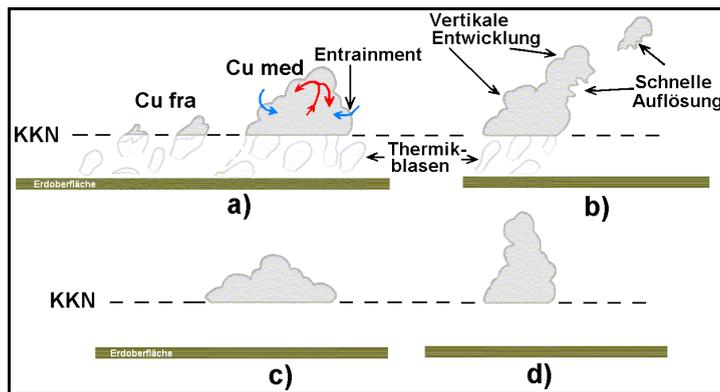
2.2.1.1.1 Größe und Gestalt

Die Größe und Gestalt der sich bildenden Wolke wird überwiegend bestimmt durch

- die statische Stabilität ab dem Kondensationsniveau,
- das Entrainment,
- die vertikale Windscherung und
- der fortschreitenden Kondensation des Wasserdampfes und dem Wachstum der Wolkentröpfchen bzw. der Anhäufung von Wasserwasser.

Faktoren, die das Wachstum von Cumuluswolken beeinflussen (Abb. 9)

Quelle : [6]



- a) Bildung von Cu, wenn Thermikblasen über das Kondensationsniveau aufsteigen
- b) Auswirkung der vertikalen Windscherung
- c) Cu bei schwacher Labilität oder trockener Umgebungsluft
- d) Cu bei starker Labilität oder feuchter Umgebungsluft

2.2.1.1.1 Statische Stabilität

Die Cumulusbildung beginnt, wenn die Thermikblasen es gerade geschafft haben, sich bis zur Wasserdampfsättigung adiabatisch abkühlen, so dass eine geringfügige weitere Hebung zur Wolkenbildung führt. Diese sich dabei entwickelnden kleinen, zerrissenen Wolkenfetzen zeigen cumulusartige Formen und werden deshalb der Art 'fractus' zugeordnet. Durch die Verschmelzung kleinerer gesättigter Thermikblasen, die sich unmittelbar oberhalb der Wolkenbasis vereinigen, wächst die Quellwolke weiter (s. Abb. 9 a)).

Als Vorankündigung von Cumuluswolken sind manchmal Dunstflecken zu erkennen, die früher 'Fumulus' hießen. Die ungesättigten Thermikblasen haben in diesem Falle nur mühselig das Kondensationsniveau erreicht, so dass der beginnende Wolkenbildungsprozess soeben sichtbar geworden ist.

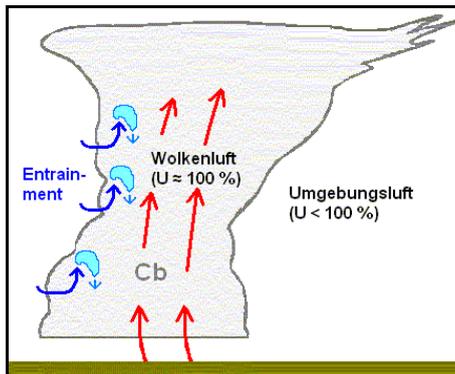
Die statische Stabilität und das Entrainment bestimmen die relativen Ausmaße der Wolke. Eine geringe feuchtlabile Schichtung oder ein trockenes Umfeld fördert die Bildung von breiten und flachen Quellwolken (s. Abb. 9 c)), während starke Labilität oder feuchte Umgebungsluft die Entstehung von hohen und schmalen Quellwolken begünstigt (s. Abb. 9 d)). Ähnliche Effekte lassen sich auch an den Rauchfahnen von Schornsteinen, Kraftwerken und Lokomotiven beobachten.

Die Auftriebskraft der Wolkenthermikblasen ist ebenfalls von der statischen Stabilität abhängig. Eine hohe Labilität bedeutet einen starken Auftrieb und umgekehrt. Die zwischen der aufsteigenden Wolkenluftblase und der Umgebungsluft wirkende Luftwiderstands- und Reibungskraft jedoch wirken der Auftriebskraft entgegen, so dass das Wolkenluftquantum nur anfänglich beschleunigt, danach hingegen mit konstanter Geschwindigkeit weiter aufsteigt.

2.2.1.1.1.2 Entrainment

Wenn ein feuchtes Luftpaket, eine Thermikblase, beschleunigt aufsteigt, bildet sich durch die Mischung mit der Umgebungsluft eine Schleppe mit reduziertem Auftrieb aus. Nachdem jedoch Kondensation stattgefunden hat, wird gesättigte Wolkenluft mit ungesättigter Umgebungsluft gemischt. Weil dadurch Wolkentröpfchen verdunsten und der Luft latente Wärme entzogen wird, entsteht eine kältere, dichtere Hülle um den wärmeren, mittleren Bereich des Wolkenluftpaketes, die abzusinken beginnt. Die damit endende horizontale Ausdehnung der Wolkenluftblase bewirkt letztlich, dass der Durchmischungs- und Verdunstungseffekt ihr gesamtes Volumen erfasst, so dass ihre Aufwärtsbewegung geschwächt wird und in der Höhe stagniert, in der Umgebungs- und Blasenluft die gleiche Temperatur aufweisen. Dieser 'Springbrunnen-Effekt' lässt sich manchmal auch vom Erdboden aus beobachten, wenn sich Cumuluswolken in sehr trockener Umgebungsluft entfalten. Ein starkes Entrainment wirkt deshalb als eine aktive Wachstumsbremse auf Cumuluswolken.

Entrainment an einer Gewitterwolke (Abb. 10)



Ohne Entrainment könnte man vermuten, dass alle Cu die gleichen Obergrenzen zeigen und ihre vertikale Entwicklung nur durch eine stabile Schicht in der Höhe begrenzt werden würde. Variationen in der Stärke des Entrainments führen daher zu unterschiedlich hohen Obergrenzen. Auch die zerfetzten Ränder von sich auflösenden Quellwolken sind Auswirkungen des Entrainments.

2.2.1.1.1.3 Vertikale Windscherung

Wenn die Windgeschwindigkeit sich mit der Höhe ändert, werden Quellwolken während ihrer Wachstumsphase verdreht. Nimmt die Geschwindigkeit z.B. mit der Höhe zu und ändert sich die Windrichtung nicht, dann entwickeln sich die Cu leewärts (s. Abb. 9 b)). Dieser Prozess fördert ebenfalls das Entrainment.

2.2.1.1.4 Anhäufung von Wassertröpfchen

Die Umwandlung des Wasserdampfes durch Kondensation in den flüssigen Aggregatzustand führt zu einer Dichtezunahme der Wolke. Diese Auswirkung nimmt mit der vertikalen Entwicklung der Wolke zu und kann den Auftrieb erheblich beeinflussen.

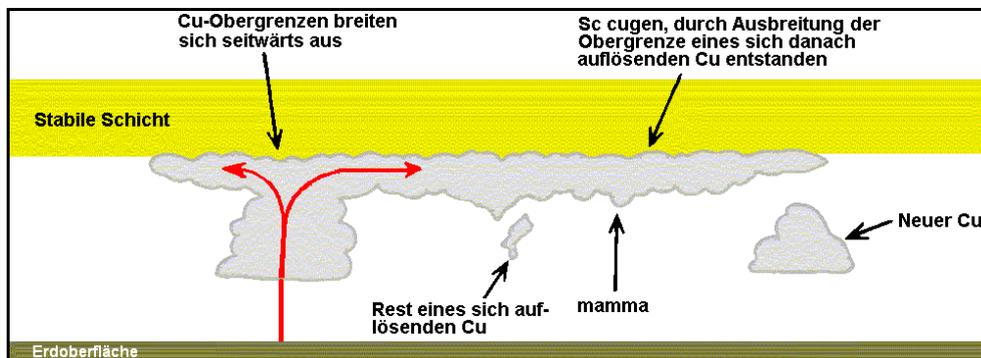
2.2.1.1.2 Stabile Schichten

Wenn es einer Quellwolke gelingt, gerade bis zu einer stabilen Schicht vorzudringen, so ist sie meist nicht mehr in der Lage, diese zu durchstoßen. Die aufsteigenden Wolkenluftpakete sammeln sich deshalb unterhalb der stabilen Schicht an und breiten sich seitwärts aus, so dass stratiforme Wolkenfelder entstehen, die - je nach Höhe - als Sc oder Ac cumulogenitus bezeichnet werden (s. Abb. 11) und klumpiger, sowie oft auch dicker und dunkler als normaler Sc oder Ac str erscheinen. Weil diese cugen-Wolken wenig Bewegung zeigen - auch die Aufwindgeschwindigkeiten der Mutterwolke in diesem Bereich sind klein -, lösen sie sich infolge Durchmischung nur zögernd auf. Häufig lassen sich solche Wolkenflecken noch über eine Stunde nach dem Zerfall des Cumulus erkennen.

Bei Ausbreitung eines kräftigen Cu unterhalb einer stabilen Schicht können sich diese Wolkenflecken zu einer ausgedehnten und beständigen Wolkenschicht verbinden, welche die Einstrahlung reduziert und weitere Cumulusbildung verhindert. Manchmal ist auch der Himmel in der Frühe klar und dann nach der morgendlichen Quellwolkenbildung am Nachmittag stark bewölkt, da sich Sc oder Ac cugen gebildet hat (s. Abb. 11).

Bildung von Sc cugen und mamma (Abb. 11)

Quelle : [6]



Bei Ausbreitung eines kräftigen Cu unterhalb einer stabilen Schicht kann eine ausgedehnte und beständige Wolkenschicht in Form eines Sc oder Ac str entstehen, welche die Einstrahlung reduziert und weitere Cumulusbildung verhindert. Manchmal ist auch der Himmel in der Frühe klar und dann nach der morgendlichen Quellwolkenbildung am Nachmittag stark bewölkt, da sich Sc oder Ac cugen gebildet hat.

2.2.1.1.3 Vertikale Mächtigkeit

Fasst man die Entwicklungsmerkmale von Quellwolken, die durch Bodenkonvektion entstehen, zusammen, lassen sich folgende Aussagen machen:

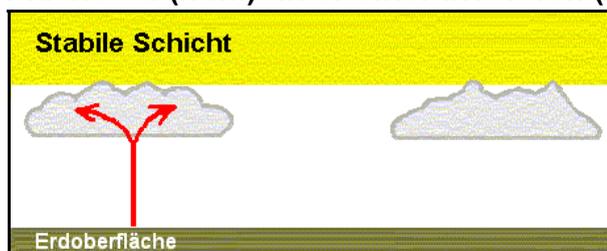
- Ein Strom von ungesättigten Thermikblasen steigt vom Erdboden bis zur Wolkenuntergrenze auf:
- einige größere Luftpakete inmitten der Wolke bewegen sich weiter aufwärts, werden aber durch Entrainment, vertikale Windscherungen, Reibung und die Anhäufung von Wassertröpfchen beeinflusst:
- eine absinkende Hülle, das Resultat der Abkühlung durch das Entrainment, umgibt die Wolke.

Durchstößt eine neue Wolkenluftblase die Wolkenobergrenze, wird sie durch Entrainment zerstört und hinterlässt eine Schleppe, die feuchter als die umgebende Luft ist. Dadurch wird die Aufwärtsbewegung des nächsten Wolkenluftpaketes gefördert, so dass die Wolke auf diese Art und Weise langsam Schritt für Schritt vertikal wächst.

Befindet sich eine die Konvektion begrenzende stabile Schicht unmittelbar oberhalb des Kondensationsniveaus, dann sind die Cu sehr flach und werden der Art 'humilis' zugeordnet (s. Abb. 12).

Flache Cu (hum) unter einer Inversion (Abb. 12)

Quelle : [6]



Befindet sich eine die Konvektion begrenzende stabile Schicht unmittelbar oberhalb des Kondensationsniveaus, dann sind die Cu sehr flach und werden der Art 'humilis' zugeordnet.

Mit zunehmender Mächtigkeit, etwa bis zu einer Dicke von um einen Kilometer, bilden sich Cu mediocris und circa ab 2 km vertikaler Ausdehnung werden Cumuluswolken als 'congestus' klassifiziert.

Die Wolkenentwicklung endet, wenn der Nachschub an Thermikblasen an ihrer Untergrenze nicht mehr vorhanden ist. Anschließend kommt es zu einer schnellen Durchmischung durch das Entrainment, so dass sich die Wolke auflöst.

Die Lebensdauer einer Cumuluswolke ist sehr unterschiedlich, aber sie beträgt etwa 5 bis 30 Minuten. Je mächtiger die Wolke ist, desto länger bleibt sie erhalten.

2.2.1.1.4 Bildung spezieller Formen

2.2.1.1.4.1 Mamma

Die Durchmischung des Sc cugen mit seiner Umgebungsluft findet überwiegend an der Untergrenze statt, so dass durch die daraus resultierende Abkühlung an der Basis Wolkenluftpakete in die wolkenfreie Umgebung absinken können und für den aufmerksamen Beobachter als beutelförmige Ausbuchtungen zu erkennen sind, die als Sonderform 'mamma' bezeichnet werden (s. Abb. 11).

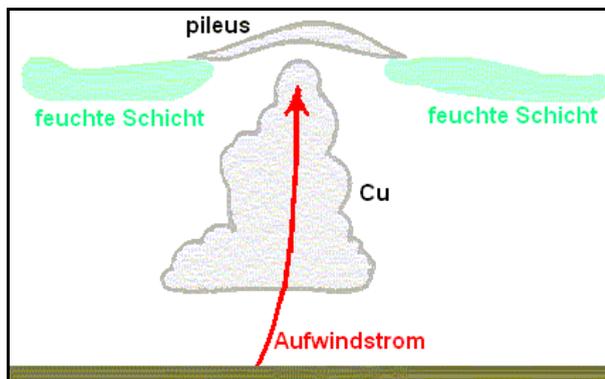
2.2.1.1.4.2 Pileus

Gelegentlich lässt sich eine glatte Kappe oder Haube an oder über der Obergrenze von kräftigen Cumuluswolken entdecken. Ein aufquellender Cu kann die Umgebungsluft lokal soweit anheben, dass bei ausreichender Feuchte eine Kappe (pileus) entsteht.

Die pileus-Wolke ist nur kurzlebig, da sie entweder vom Cu durchstoßen wird oder in tiefere Schichten absinkt, wo sie dann durch die adiabatische Erwärmung verdunstet.

Pileus (Abb. 13)

Quelle : [6]



2.2.1.1.5 Höhe der Untergrenze

Die Höhe, in der Kondensation in der aufsteigenden Thermikblase einsetzt, die Wolkenbasis, hängt vom Wasserdampfgehalt des den Erdboden verlassenden Luftpaketes ab. Ist die Luftfeuchte gering, muss die Abkühlungsrate größer sein, so dass die Wolkenbasis hoch liegt. Umgekehrt ergibt eine große Luftfeuchte eine niedrige Wolkenuntergrenze.

Für die Quellwolkenbasis gilt deshalb:

- Im Tagesverlauf steigt sie, dem Tagesgang der relativen Luftfeuchte in Bodennähe entsprechend, an und erreicht ein Maximum nachmittags; wenn z.B. das KKN z.Z. der ersten Cu-Bildung bei 500 m liegt, dann nimmt die Basis bis 1200 m oder auch bis auf 2000 m zu.
- Die Untergrenzen sind im allgemeinen im Winter niedriger als im Sommer und
- das KKN liegt an Luv-Küsten tiefer als im Landesinneren.

2.2.1.1.6 Tagesgang von Cumuluswolken

Der Werdegang von Quellwolken wird überwiegend von der Temperatur des Untergrundes bestimmt. Wenn die Bodenthermik nachlässt und die Zufuhr an Wasserdampf den Verlust an Wolkensubstanz durch Entrainment nicht mehr ausgleichen kann, beginnen die Cu sich aufzulösen.

Quellbewölkung, die über dem Land entsteht, zeigt deshalb in Abhängigkeit von der Aufheizung des Untergrundes einen ausgeprägten Tagesgang. Nach einer klaren Nacht hat sich in den untersten Schichten der Troposphäre oft eine stabile Schicht geformt, die durch die beginnende solare Einstrahlung allmählich zerstört wird. Durch die zunehmende Labilisierung bildet sich dann zuerst Cu fra, der in Abhängigkeit von den wachstumsbestimmenden Faktoren (s. 2.2.1.1.1) häufig an vertikaler Mächtigkeit gewinnt. Ein Quellwolkenmaximum (Bedeckungsgrad und Dicke) tritt dann etwa zur Zeit der Tageshöchsttemperatur auf. Am späten Nachmittag bzw. am frühen Abend lässt der Nachschub an frischen Thermikblasen nach, da die untersten Schichten wieder stabiler geworden sind, so dass die vorhandenen Cumuluswolken anfangen sich aufzulösen. Der Himmel wird dann wieder klar bzw. ein paar Wolkenfelder von mehr beständigem Sc (Ac) cugen vermögen durchaus zurückbleiben.

Über dem Meer dagegen fehlt der Tagesgang, weil die Wassertemperatur keinen wesentlichen Tagesgang aufweist. Dort kann die Konvektion bei Kaltluftadvektion über warmen Wasser deshalb auch nachts anhalten.

Über dem Land entwickeln sich Cumuluswolken am besten über guten Thermikquellen, von denen sie mit der Strömung leewärts driften und für den Beobachter meist unregelmäßig verteilt am Himmel erscheinen.

Manchmal jedoch können sich Reihen von Quellwolken ausbilden, die als Wolkenstraßen (Cu ra) bezeichnet werden.

Im gebirgigen Gelände stellen die sonnenbeschienenen Hänge gute Thermikquellen dar, so dass sich dort Quellwolken früher entwickeln und später auflösen als im Flachland oder über schattigen Abhängen.

Ab und zu wird der übliche Tagesgang der Cu-Bewölkung modifiziert oder eine Quellwolkenbildung findet sogar überhaupt nicht statt. Einige Gründe dafür sind, dass

- die Umgebungsluft zu trocken ist, so dass durch Entrainment der Wasserdampfgehalt einer aufsteigenden Thermikblase zu gering wird,
- eine stabile Schicht vorhanden ist, die unterhalb des Kondensationsniveaus liegt. Solche Verhältnisse sind besonders bei sommerlichen Hochdrucklagen möglich und
- die Einstrahlung durch höhere Wolkenschichten entscheidend reduziert wird.

Cumuluswolken können auch zu unerwarteten Zeiten auftreten, besonders nachts. Auslösende Faktoren sind dann Bodenkonvergenzen bzw. frontale oder orographische Hebungsvorgänge, so dass sich jederzeit Cu bilden können, sofern die Schichtung feuchtlabil ist. Diese Wolken besitzen jedoch keine Thermikquelle, ihre Basis ist im Aussehen glatter und mehr einheitlich, und sie zeigen eine ausgesprochene Neigung, sich in Gruppen oder Reihen anzuordnen und treten seltener vereinzelt und zufällig verteilt am Himmel auf.

2.2.1.2 Cumulonimbuswolken

Cumulonimbuswolken entwickeln sich meist aus mächtigen Cu con. Ihr Erscheinungsbild unterscheidet sich von Cumuluswolken insofern, als dass zumindest einige ihrer oberen kleineren Aufquellungen die typischen scharfen Umrisse eingebüßt haben (Cb cal) oder die Obergrenze diffus und streifig aussieht (Cb cap).

Wenn einige der oberen kleineren Aufquellungen unscharf, diffus oder streifig aussehen, so ist dies ein sichtbares Zeichen dafür, dass die Wolke zu vereisen beginnt und damit die Bildung von intensivem Niederschlag einsetzt.

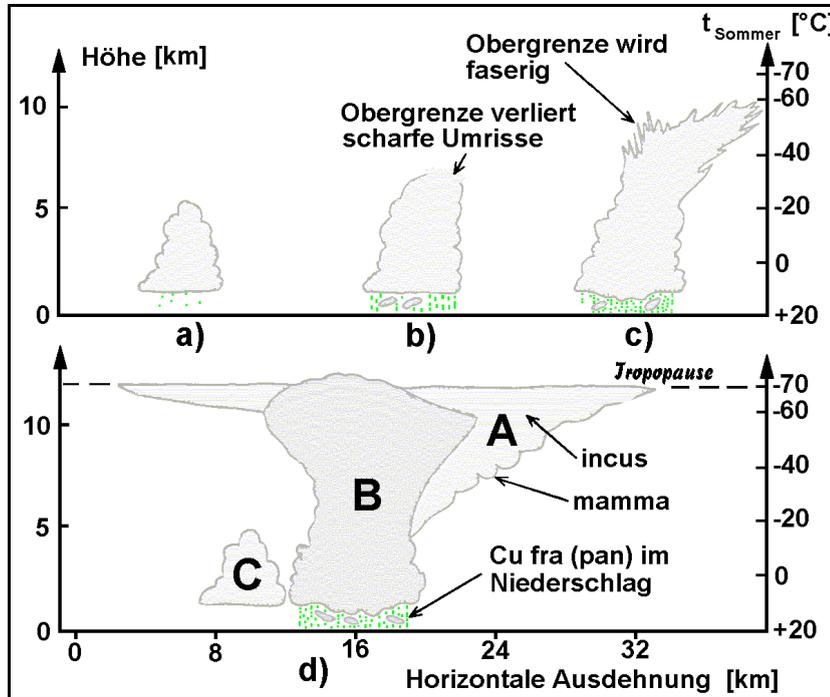
Manchmal erfolgt die Umwandlung eines Cu in einen Cb, wenn die Temperatur sogar über -10 °C bzw. diese knapp unterschreitet (Koaleszenz-Gefriervorgang bei maritimer Mikrostruktur und großer Eisübersättigung der Wolke), meist jedoch sind dazu Werte von unter -20 °C notwendig, die normalerweise etwa in troposphärischen Höhen von 4 bis 6 km auftreten.

Cumulonimben besitzen deshalb oft eine große vertikale Mächtigkeit und können, wenn die gesamte Troposphäre labil geschichtet ist, bis zur Tropopause reichen.

In Mitteleuropa werden im Sommer Obergrenzen von 12 km beobachtet, aber in den Tropen sind Tops von über 18 km durchaus nicht ungewöhnlich.

Entwicklungsphasen eines Cb (Abb. 14)

Quelle : [6]



Die Grafik zeigt den Werdegang einer einzelnen sommerlichen Cumulonimbuswolke, die sich meist aus einem mächtigen Cu con entwickelt. Das Erscheinungsbild eines Cb unterscheidet sich von hochreichenden Cumuluswolken insofern, als dass zumindest einige seiner oberen kleineren Aufquellungen die typischen scharfen Umrisse eingebüßt haben (Cb cal) oder die Obergrenze diffus oder streifig aussieht (Cb cap). Wenn einige der oberen kleineren Aufquellungen diffuse und schlierige Ränder aufweisen, so ist dies ein sichtbares Zeichen dafür, dass die Wolke zu vereisen beginnt und damit die Bildung von intensivem Niederschlag einsetzt.

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| a) : Cu con | A : Rest der alten Zelle |
| b) : Cb cal | B : neue Zelle |
| c) : Cb cap | C : Entwicklung einer neuen Zelle |
| d) : der zusammengesetzte Cb cap inc | |

Cumulonimben sind häufig mit Starkniederschlag und mitunter auch mit Donner und Blitz verbunden. Die ausgedehnten, kräftigen konvektiven Vorgänge in einem sommerlichen Cumulonimbus verursachen außerdem kraftvolle Auf- und Abwindströme, wobei Vertikalgeschwindigkeiten von mehr als 15 m s^{-1} nicht ungewöhnlich sind.

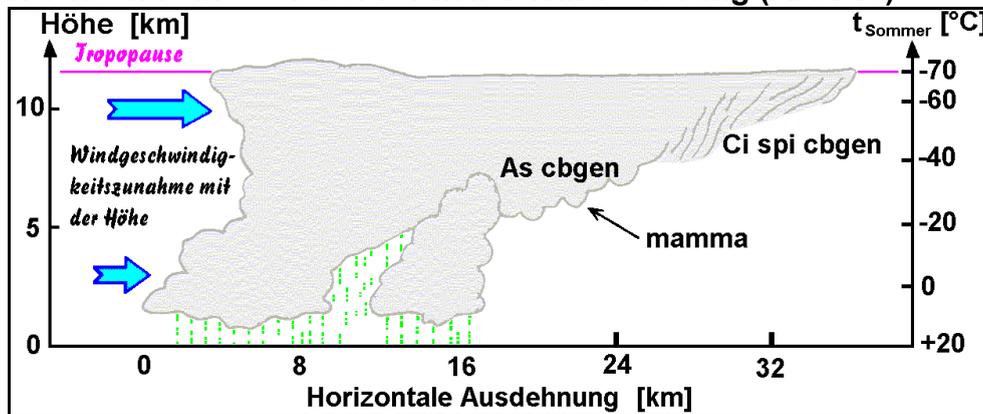
In Kaltluftmassen können sich aber auch flache Cb ausbilden, die gelegentlich Ausmaße von weniger als 3 km aufweisen, weil dann Temperaturen von unter -10 °C auch in der tiefen Troposphäre angetroffen werden.

Hat der Gefrierprozess erst einmal begonnen, entwickelt er sich rapide. In etwa 10 bis 20 Minuten ist dann bereits ein großer Teil des unterkühlten Wolkenwassers in Eiskristalle umgewandelt - ein Prozess, der als Vereisung bezeichnet wird. Anschließend kann der obere Wolkenteil in eine Vielzahl von Fallstreifen entarten, so dass eine dichte Cirruswolke entsteht, die als Ci spi cbgen bezeichnet werden kann (s. Abb. 15). Im Wolkeninneren jedoch steigen weiter große Luftpakete auf, so dass sich die Wolke weiter vertikal ausdehnt.

Ein Cumulonimbus, dessen oberer Teil eine faserige, streifige Ci-Struktur zeigt, wird Cb cap genannt und die Übergangsphase vom Cu con zum Cb, in der die oberen Aufquellungen der Wolke ihre scharfen Umrisse verlieren, Cb cal (s. Abb. 14).

Wachstum eines Cb bei vertikaler Windscherung (Abb. 15)

Quelle : [6]



Nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, kann sich die Obergrenze eines Cb in Form eines großen Federbusches als As cbgen und Ci spi cbgen häufig über mehrere Dekakilometer stromabwärts ausbreiten.

Wenn der obere Abschnitt eines Cb auf eine stabile Schicht trifft, kann er sich unterhalb der Inversion ausbreiten und ein glattes Erscheinungsbild mit streifigen, faserigen Rändern annehmen. Bleibt der dabei sich ausweitende obere Wolkenteil mit der Mutterwolke verwachsen und wird vor allem durch vertikale Windscherungen horizontal verblasen, sieht er wie ein Amboss aus (Cb cap inc [s. Abb. 14 d]).

Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass mehrere vertikal mächtige Cumulonimben seitlich expandieren, so dass eine Schichtwolke entsteht, die an As oder Ns erinnert und deshalb als As cbgen oder Ns cbgen bezeichnet werden kann. Ihr Aussehen unterscheidet sich wesentlich vom Ac cugen oder Sc cugen, da die letzteren Wolken aus Wassertröpfchen bestehen und selten Niederschlag bringen, während die ersteren hauptsächlich Eisteilchen, besonders Schneeflocken, beinhalten. Aus diesen Wolken fällt deshalb häufig Niederschlag, so dass die Wolkenbasis diffus und konturlos erscheint.

Günstige vertikale Windscherungen fördern das Wachstum eines Cb. Lang anhaltende und schwere Gewitter können sich nur ausbilden, wenn erhebliche vertikale Windscherungen vorhanden sind.

Nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, kann sich die Obergrenze in Form eines großen Federbusches als As cbgen und Ci spi cbgen häufig über mehrere Dekakilometer stromabwärts erstrecken, während darunter bereits neue Konvektion einsetzt (s. Abb. 15).

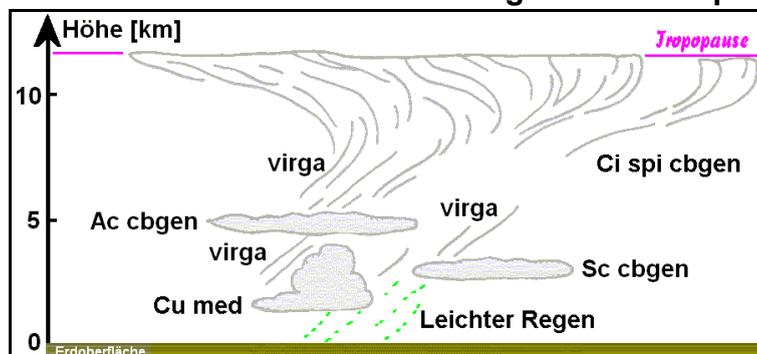
An der Unterseite eines Ambosses kann 'mamma' auf dieselbe Weise wie beim Sc (Ac) cugen entstehen, aber diese Erscheinung ist am häufigsten bei Cumulonimben ausgebildet.

Kurzzeitig auftretende, lokale Schauerwolken zeigen eine relativ einfachen Aufbau. Die zur Entstehung größerer Wolkenelemente notwendigen Aufwindgeschwindigkeiten sind zwar vorhanden, aber die Schauerwolke löst sich wieder auf, wenn der ausfallende Niederschlag den Aufwind unterdrückt. Dieser Lebenszyklus beträgt ca. 30 bis 60 Minuten. Häufig lassen sich Cloud cluster beobachten, die aus mehreren zusammengewachsenen Cb bestehen und Multizelle heißen. Selten treten Gewitterwolken auch als eine riesige Einzelzelle, Superzelle genannt, in Erscheinung. Die letzten beiden Gewittergebilde entwickeln eine Eigendynamik und können so auch mehrere Stunden andauern.

Lässt die Konvektion nach, dann löst sich der Cb auf und hinterlässt ungleichmäßig verteilte Wolkenschichten in unterschiedlichen Höhen (s. Abb. 16), vor allem aber Ci spi cbgen, der am längsten bestehen bleibt - so um die 12 bis 24 Stunden - bevor auch er durch das Ausfallen größerer Teilchen (virga) und Eisverdunstung verschwindet.

Wolkenschichten nach Auflösung eines Cb cap inc (Abb. 16)

Quelle : [6]



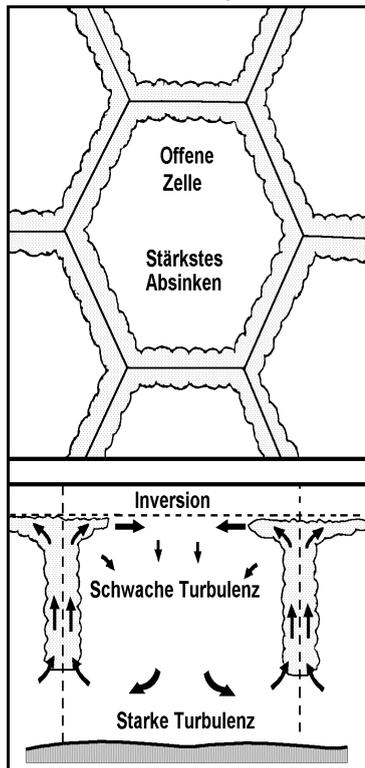
Lässt die Konvektion nach, dann löst sich der Cb auf und hinterlässt ungleichmäßig verteilte Wolkenschichten in unterschiedlichen Höhen, vor allem aber Ci spi cbgen, der am längsten bestehen bleibt - so um die 12 bis 24 Stunden - bevor auch er durch das Ausfallen größerer Teilchen (virga) und Eisverdunstung verschwindet. Die größeren Eiskristalle, die aus dem Ci spi als virga ausfallen, können in einen Ac und Sc cbgen hineinfallen und dann schwachen Niederschlag verursachen.

Bei sehr instabiler Troposphäre können nach Sonnenuntergang durch Ausstrahlung an den Obergrenzen der verbleibenden Wolken neue Cumulonimben entstehen.

Bei einer mächtigen Kaltluftschicht über dem Meer ist in der Nähe von Tiefdruckgebieten oder bei größeren Temperaturunterschieden zwischen Wasser und Luft die Ausbildung von hexagonalen Wolkenstrukturen möglich, die in der Satellitenmeteorologie als offene Zellen bezeichnet werden.

Offene Zellen (Abb. 17 a) und 17 b))

Quelle : [10]



Aufsicht und Querschnitt eines Konvektionssystems, das hexagonale offene Zellen bildet.

Bei einer mächtigen Kaltluftschicht über dem Meer ist in der Nähe von Tiefdruckgebieten oder bei größeren Temperaturunterschieden zwischen Wasser und Luft die Ausbildung von hexagonalen Wolkenstrukturen möglich, die in der Satellitenmeteorologie als offene Zellen bezeichnet werden.



Quelle : [11]

Hexagonale Zellen über dem Atlantischen Ozean bei den Bahamas am 19.02.2002

2.2.1.3 Cumuliforme Wolken im mittleren und hohen Niveau

Alle cumuliformen Wolken, die bisher angesprochen wurden, hatten ihre Untergrenzen in Bodennähe. Manchmal jedoch lassen sich auch Quellformen im mittleren und großen (selten) troposphärischen Höhen beobachten. Diese Wolken entstehen hier nicht durch die ungleichmäßige Aufheizung der Atmosphäre durch den Untergrund, da ihre Untergrenze oberhalb der Konvektionsschicht liegt, sondern sie bilden sich bei einer labilen Schichtung durch konvektionsauslösende Prozesse wie Konvergenz und Kaltluftadvektion in der Nähe eines Tiefdruckgebietes, durch orographische Hebung und auch durch Windscherungen.

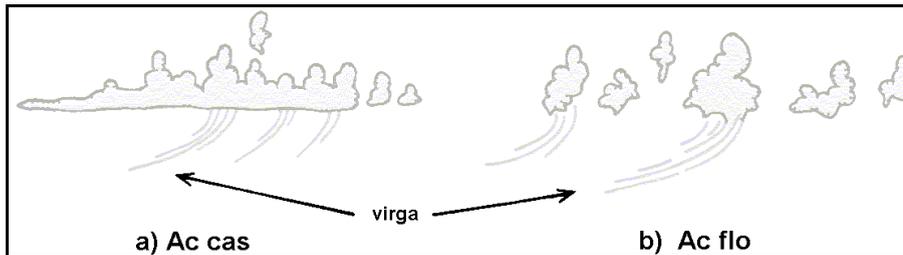
2.2.1.3.1 Mittleres Stockwerk

Cumuliforme Wolken im mittleren Stockwerk treten als *Alto*cumulus *castellanus* und *floccus* auf, bei denen oft *virga*-Erscheinungen zu beobachten sind:

- *Ac cas* ☞ eine Reihe von Aufquellungen aus einer gemeinsamen, flachen Basis, die der Wolke eine zinnenartiges Aussehen verleiht;
- *Ac flo* ☞ einzelne, unregelmäßig verteilte cumulusähnliche Büschel oder Bäusche mit mehr oder minder ausgefransten Unterseiten.

Ac cas und Ac flo (Abb. 18)

Quelle : [6]



Ac cas und Ac flo sind häufig gemeinsam anzutreffen und zeigen an, dass die Atmosphäre instabil geschichtet ist. Weil eine labile Schichtung die notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Cumulonimbuswolken darstellt, ist ein aufkommender Ac cas oder Ac flo oft ein erstes Anzeichen für ihre Entwicklung in der Umgebung des Beobachters, also etwa in einem Umkreis von 160 km.

Befindet sich Ac cas im unmittelbaren Bildungsstadium, ähnelt sein Aussehen anfangs mehr den Wolkenflecken von Ac len, einige Minuten später entwickeln sich jedoch aus einer gemeinsamen Basis cumulusartige Türmchen.

Manchmal entsteht auch eine ausgedehnte, dicke und ununterbrochene Wolken-schicht, so dass die zinnenartigen Auswüchse nicht zu sehen sind, aber ein aufmerksamer Beobachter kann die Türmchen indirekt an der charakteristisch gefleckten Struktur der Wolkenuntergrenze erkennen, die aufgrund der Schattenbildung auf dichtere Wolkenteile hinweist. Diese Art der Bewölkung tritt manchmal in mehreren Höhen gleichzeitig und auch in Verbindung mit anderen Schichtwolken wie Ac und Sc auf; das Himmelsbild zeigt dann ein chaotisches Aussehen.

Ab und zu lassen sich auch Fallstreifen erkennen, die cirriformen Wolken ähneln und vor dem Erreichen des Erdbodens verdunsten. Wenn sie gut ausgeprägt sind, verwandeln sie den Ac flo-Bausch in einen scheinbaren, winzigen winterlichen Cb.

Hin und wieder können auch die größeren ausfallenden Elemente schmelzen und als einzelne Regentropfen den Erdboden erreichen (beobachtet am 02.07.1994 gegen 16.00 MESZ in 64409 Messel/Hessen).

Bei Ac flo, der bei Temperaturen von unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftritt, kann manchmal eine vollständige Auflösung und Umwandlung in Fallstreifen aus Eispartikeln beobachtet werden, so dass Cirruswolken entstehen, die als Ci acgen bezeichnet werden. Dieser Vorgang dauert etwa an die 10 bis 20 Minuten.

2.2.1.3.2 Hohes Stockwerk

Cumuliforme Wolken des hohen Stockwerks können bisweilen beobachtet werden, sind aber selten. Die tiefen Temperaturen in diesen Höhen bewirken, dass jedes sich in der Wolke formende Wassertröpfchen rasch gefriert.

Cc flo/Cc cas und Ci flo/Ci cas ähneln im Erscheinungsbild ihren Gegenstücken Ac flo/Ac cas.

Cc flo/Cc cas bestehen aber aus sehr kleinen, unten zerfetzten Büscheln bzw. winzigen turmartigen Aufquellungen (<1°) und Ci flo/Ci cas zeigen feinere Einzelheiten als der Ac und treten meist immer gemeinsam mit anderen Ci-Arten auf.

2.2.2 Stratiforme Wolken

Stratiforme Wolken umfassen die vier Wolkenklassen Stratus, dünne stratiforme Wolken der Art stratiformis, dünne stratiforme Wolken der Art lenticularis und dicke stratiforme und mehrschichtige Wolken.

Stratiforme Wolken (Tab. 34)

Form	Gattung	Art	Unterart
Stratus	St	neb, fra	op, tr, un
dünne stratiforme Wolken der Art stratiformis	Sc, Ac	str	tr, pe, un, la
	Cc	str	un, la
dünne stratiforme Wolken der Art lenticularis	Sc, Ac, Cc	len	*
dicke stratiforme und mehrschichtige Wolken	dick	Ns	–
		As	–
		Sc, Ac	str
	mehrschichtig	Ns - As - Cs	
Ac - AcAs - Ns			

Diese Klassifikation betrifft nur stratiforme Bewölkung, so dass die Tabelle nicht vollständig ist.

* : *in der Wolkenklassifikation vorhanden, aber nicht in dieser Tabelle, da hier ohne Bedeutung*

– : *nicht auftretend*

2.2.2.1 Stratus

Stratus stellt die Wolkengattung mit der tiefsten Untergrenze dar, die selten über 500 m liegt, und St tritt häufig in Verbindung mit Nebel auf. Die niedrige Wolkenbasis, oft mit schlechten Sichten verbunden, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Luftfahrt, weil die Anfliegarkeit eines Flugplatzes u.a. von der Höhe der Untergrenze und den horizontalen Sichtverhältnissen abhängig ist.

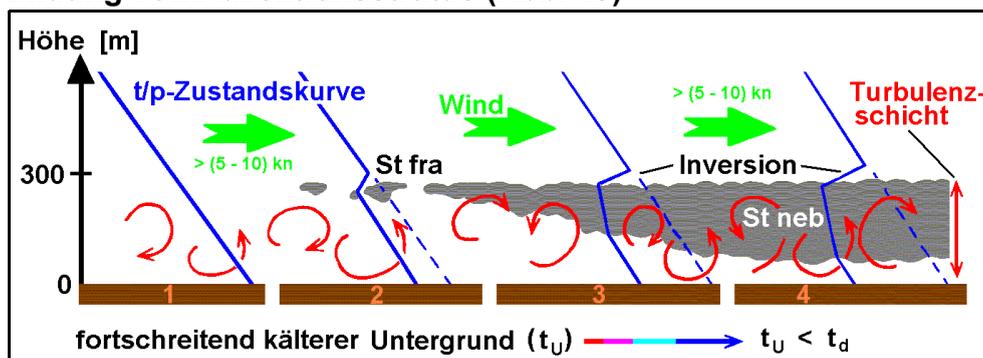
2.2.2.1.1 Advektionsstratus

Stratus bildet sich häufig auf dieselbe Art und Weise wie Advektionsnebel. Die Abbildung 19 zeigt die Entstehung von Advektionsstratus, wenn feuchte Luft über kalten Untergrund geführt wird, dessen Temperatur unter dem Taupunkt der Luft liegt. Die Kondensation beginnt hierbei an der Obergrenze der Durchmischungsschicht.

Besonders wirksam ist dieser Kondensationsprozess, wenn maritime Warmluft über eine schmelzende, schneebedeckte Erdoberfläche streicht. Auch im Falle das feuchte, warme Luft eingeflossen ist, die sich nachts durch langwellige Ausstrahlung abkühlt, kann sich Stratus entwickeln, vor allem dann, wenn der Untergrund vom Regen nass ist.

Bildung von Advektionsstratus (Abb. 19)

Quelle : [6]



t_U : Temperatur des Untergrundes
 t_d : Taupunkt der Luft

Dieser Zustand fördert die Entstehung von Advektionsstratus und Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenz zwischen Luft und Erdboden bestimmen überwiegend den Bildungsvorgang. Bei Windgeschwindigkeiten von über 5 -10 Knoten entsteht bevorzugt Stratus, aber wenn der Wind zu stark wird, kann der Himmel durchaus auch klar bleiben, weil die Abkühlung eine vertikal zu mächtige Schicht erfasst. Der Temperaturrückgang ist dann zu gering, so dass keine Kondensation einsetzt.

Große Temperaturdifferenzen zwischen Erdboden und Luft haben den gegenteiligen Effekt, so dass sich auch bei starkem Wind Stratus entwickeln kann.

Wenn sich Advektionsstratus durch Abkühlung von unten her formt, existiert meist eine Inversion in Bodennähe mit einer Untergrenze in etwa 200 bis 1000 m über Grund. Die Wolkenobergrenze liegt dann, gut ausgeprägt, nahe der Basis der stabilen Schicht, so dass die Hochlagen im Bergland bis in den wolkenfreien Raum darüber hineinragen können.

Zeigt die Wolkenbasis des Stratus wenig bzw. keine Strukturen, so ist der St der Art nebulosus zu zuordnen. In der Bildungs- und Auflösungsphase von St neb besteht die Möglichkeit, dass dabei St fra auftritt.

Durch hinreichende Erwärmung löst sich Advektionsstratus auf. Dieser Fall geschieht durch die tägliche Einstrahlung aber auch durch Advektion der Wolkenluft über wärmeren Untergrund. Auch eine Zunahme der Windgeschwindigkeit hat denselben Effekt, aber dieser Prozess ist sehr komplex.

2.2.2.1.2 Andere Bildungsarten

Stratus bildet sich ebenfalls bei orographischer Hebung und durch Turbulenz in Verbindung mit Niederschlag.

2.2.2.1.2.1 Orographische Hebung

Wird auf der Luvseite von kleineren Höhenzügen (s. Nebelbildung) feuchte Luft bei sehr stabiler Schichtung gehoben, kann sich auch Stratus bilden.

2.2.2.1.2.2 Verdunstung von Niederschlag

Fällt Niederschlag aus einer höheren Wolkenschicht und verdunstet teilweise unterhalb der Wolkenbasis, so wird die Luft abgekühlt und mit Wasserdampf angereichert. In der bodennahen Luftschicht können dann bei ausreichender Luftfeuchte durch Turbulenz einzelne Wolkenfetzen entstehen, die bei anhaltendem Niederschlag an Ausdehnung gewinnen und eventuell auch eine komplette Wolkenschicht ergeben, die mit der Untergrenze der niederschlagsbildenden Bewölkung zusammenwächst. Dieser Typ des Stratus wird als 'pannus' (Schlechtwetterfetzen) bezeichnet und tritt häufig in Verbindung mit Ns, As, Cu und Cb auf.

2.2.2.2 Dünne stratiforme Wolken der Art stratiformis

Jede der drei Gattungen Sc, Ac und Cc zeigt eine umfangreiche Formenvielfalt, aber am häufigsten werden ausgedehnte horizontale Wolkenfelder oder -schichten der Art 'stratiformis' beobachtet. Diese Wolken entstehen durch langsame großräumige Hebungsvorgänge, besonders in Frontnähe, und sie lösen sich durch reverse Vorgänge, also durch adiabatische Erwärmung aufgrund geringfügiger Absinkprozesse, wieder auf.

Dünne stratiforme Wolken der Art 'stratiformis' sind häufig durchscheinend, weisen Lücken auf oder zeigen wellenförmige Untergrenzen, so dass die Unterarten perlucidus, translucidus, lacunosus und undulatus klassifiziert werden können.

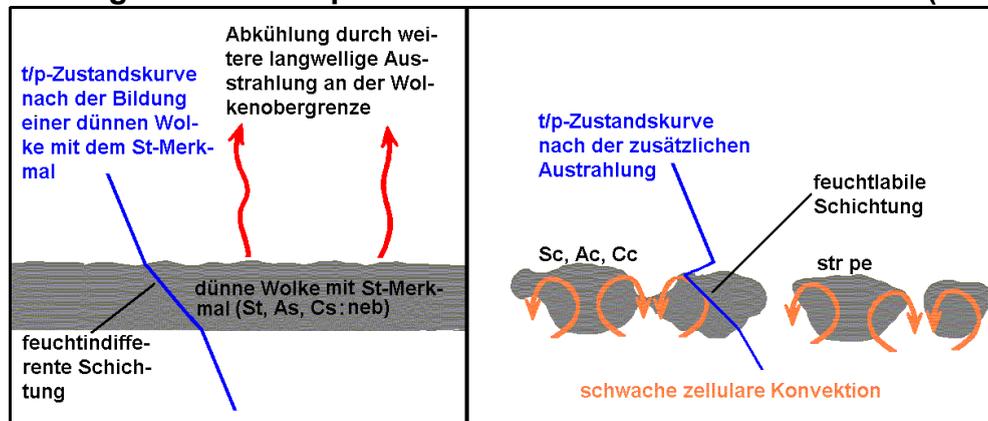
2.2.2.2.1 Perlucidus

Bei der Unterart 'perlucidus (pe)' zeigt die ausgedehnte Schichtwolke in Form von Flecken oder Feldern deutlich ausgeprägte, kleine Lücken zwischen den einzelnen Wolkenteilen, die der Wolke in etwa das Aussehen einer Krokodilhaut geben.

Perlucidus-Lücken entstehen aus einer anfänglichen dünnen stratiformen Wolke, bei der nach ihrer Bildung die langwellige Ausstrahlung (gerade am Tage) an der Wolkenobergrenze zu einer Abkühlung führt, so dass der vertikale Temperaturgradient innerhalb der Wolkenschicht zunimmt, bis der feuchtadiabatische Gradient überschritten wird. Die dadurch erfolgende Labilisierung verursacht eine schwache zellulare Konvektion, so dass Bénard-Zellen entstehen (s. Abb. 20).

Bildung der Unterart pe in einer dünnen stratiformen Wolke (Abb. 20)

Quelle : [6]



Bénard-Zellen stellen eine besondere Form der Konvektion dar, die sich dadurch auszeichnet, dass die Auf- oder Abwärtsbewegung im Inneren der Konvektionszelle genau entgegengesetzt zu ihren Rändern gerichtet ist. Im aufsteigenden Ast der Konvektionszelle

verdickt sich die Wolke und das Absinken an ihren Rändern führt zu einer Wolkenauflösung, so dass sich Lücken ausformen. Die stabile Schicht, die sich bei diesem Abkühlungsprozess an der Wolkenobergrenze gebildet hat, verhindert eine Ausdehnung der Konvektion in höhere Schichten.

Bénard-Zellen stellen eine besondere Form der Konvektion dar, die sich dadurch auszeichnet, dass die Auf- oder Abwärtsbewegung im Inneren der Konvektionszelle genau entgegengesetzt zu ihren Rändern gerichtet ist. Im aufsteigenden Ast der Konvektionszelle verdickt sich die Wolke und das Absinken an ihren Rändern führt zu einer Wolkenauflösung, so dass sich Lücken formen. Die stabile Schicht, die sich bei diesem Abkühlungsprozess an der Wolkenobergrenze gebildet hat, verhindert eine Ausdehnung der Konvektion in höhere Schichten (s. Abb. 20).

Manchmal lassen sich auch Perlucidus-Formen beobachten, die unmittelbar in klarer Luft entstehen, weil wahrscheinlich nach Auflösung einer ähnlichen Wolke ein zelluläres Muster der Feuchteverteilung bereits vorhanden war.

Periodisch sich umkehrende Vertikalbewegungen, d.h. ein Wechsel von Ab- und Aufwärtsbewegungen der Luft, welche die notwendige Voraussetzung für die Auflösung und Neubildung von perlucidus-Wolken darstellen, sind nicht ungewöhnlich und treten besonders in der Nähe von schwach ausgeprägten Tiefdruckgebieten und Fronten auf.

Langjährige Beobachtungen ergaben, dass die Ausdehnung der Wolkenteile mit der Dicke der Konvektionsschicht zunimmt. Im hohen Wolkenstockwerk ist die Wolke dünn, so dass die Wolkenteile kleiner als 1° sind. Im mittleren Stockwerk sind die Wolkenelemente des Ac str pe meist etwa 1 bis 5° breit, aber sie können im Bildungsstadium sehr klein sein, so dass die neuesten Ränder einer ständig wachsenden Wolkenschicht eine dünne Struktur zeigen, die dem Cc ähnelt, während ältere Wolkenteile mehr gröbere Formen aufweisen. Beim Sc str pe sind die Zellen immer weiter als 5° .

2.2.2.2.2 Translucidus

Als 'translucidus' werden Wolken in ausgedehnten Flecken, Feldern oder Schichten bezeichnet, die größtenteils so durchscheinend sind, dass die Stellung von Sonne oder Mond wie durch Mattglas zu erkennen ist. Diese Unterart lässt sich oft beim Auftreten der Wolken-gattungen St, Sc, Ac und As beobachten.

2.2.2.2.3 Lacunosus

Wolkenfelder, -flecken oder -schichten, die gewöhnlich ziemlich dünn sind und als wesentliches Kennzeichen mehr oder weniger regelmäßig verteilte runde Löcher aufweisen, deren Ränder häufig ausgefranst sind, werden der Unterart 'la' zugeordnet.

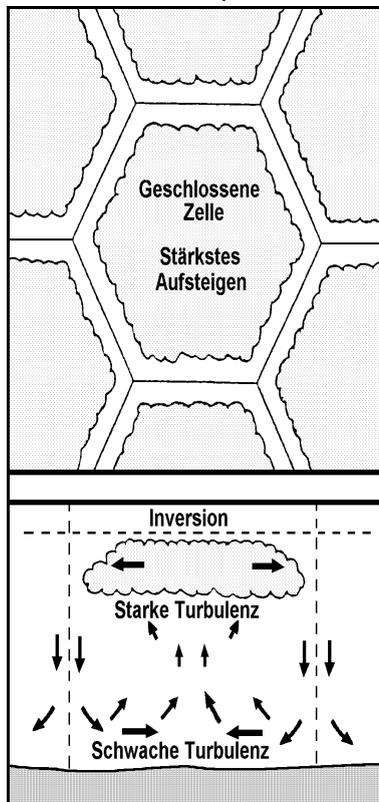
Die Wolkenteile und wolkenfreien Zwischenräume zeigen eine netz- oder wabenartige Struktur, die das Resultat einer oberhalb oder unterhalb der Wolke stattfindenden, in ihr Inneres reichenden zellularen Konvektion aus wolkenfreier Luft zu sein scheint.

2.2.2.2.4 Geschlossene Zellen

Wird z.B. über dem Meer in Bodennähe Warmluft durch eine flache, nur etwa 1000 bis 2000 m dicke Schicht polarer Kaltluft ersetzt, so bildet die an der Obergrenze der Advektionsschicht vorhandene ausgeprägte Inversion eine Sperrschicht für Vertikalbewegungen. Sind die Temperaturunterschiede zwischen Wasser und Luft nicht all zu groß, breitet sich die durch konvektive Vorgänge entstandene Wolke aufgrund ihrer geringen Aufwindgeschwindigkeit unterhalb der Inversion horizontal aus. An den Randzonen der Wolke sinkt die Luft dann in schmalen Bändern, die sich manchmal hexagonal anordnen, wieder ab. Dadurch können sich bienenwabenförmige Wolkenzellen bilden, die in der Satellitenmeteorologie als geschlossene Zellen bezeichnet werden.

Aufsicht und Querschnitt von geschlossenen Zellen (Abb. 21)

Quelle: [10]



Aufsicht und Querschnitt eines Konvektionssystems, das hexagonale geschlossene Zellen hervorruft.

Wird z.B. über dem Meer in Bodennähe Warmluft durch eine flache, nur etwa 1000 bis 2000 m dicke Schicht polarer Kaltluft ersetzt, so bildet die an der Obergrenze der Advektionsschicht vorhandene ausgeprägte Inversion eine Sperrschicht für Vertikalbewegungen. Sind die Temperaturunterschiede zwischen Wasser und Luft nicht all zu groß, breitet sich die durch konvektive Vorgänge entstandene Wolke aufgrund ihrer geringen Aufwindgeschwindigkeit unterhalb der Inversion horizontal aus. An den Randzonen der Wolke sinkt die Luft dann in schmalen Bändern, die sich manchmal hexagonal anordnen, wieder ab. Dadurch können sich bienenwabenförmige Wolkenzellen bilden, die in der Satellitenmeteorologie als geschlossene Zellen bezeichnet werden.

Diese verhältnismäßig schwache Konvektion ist in der Nähe von Hochdruckgebieten über subtropischen Meeresgebieten häufig anzutreffen.

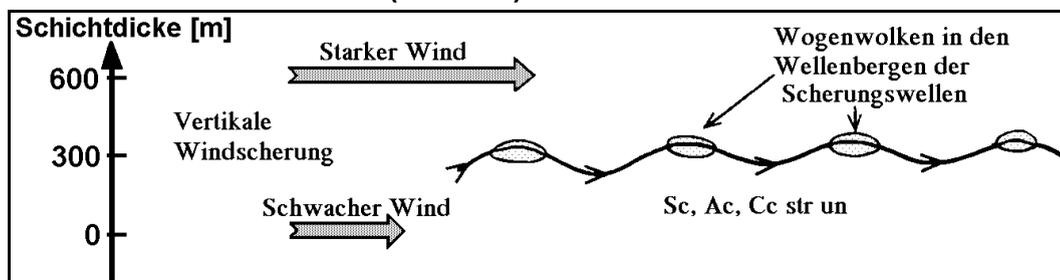
2.2.2.2.4 Undulatus

Undulatus-Wolken sind Wolkenfelder, -flecken oder -schichten in Wellenform. Diese Wellen erscheinen einerseits als annähernd gleichmäßig auftretende Lücken in der Größenordnung von ca. 500 bis 1000 m oder andererseits als parallele Streifen bzw. Bänder, deren Achsen häufig fast senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufen.

Wogenwolken formen sich in den Wellenkämmen einer Reihe von Scherungswellen mit Amplituden von 10 bis mehrere 100 m, die manchmal an der horizontalen Grenzfläche von zwei übereinander liegenden, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit strömenden Luftschichten auftreten. Diese Wolken selbst bewegen sich mit einem mittleren Tempo.

Undulatus-Schichtwolke (Abb. 22)

Quelle : [6]



Tritt nur in einer relativ dünnen Schicht Kondensation ein, entwickeln sich ballen- oder walzenförmige Strukturen, die durch wolkenfreie Räume voneinander getrennt sind. Bei einer mächtigen Kondensationsschicht sind die Wogenwolken nur noch an ihren Helligkeitsunterschieden an der Wolkenbasis zu erkennen.

Besonders geeignet als Bildungsraum ist die Nähe eines Jetstreams.

2.2.2.2.5 Lenticularis

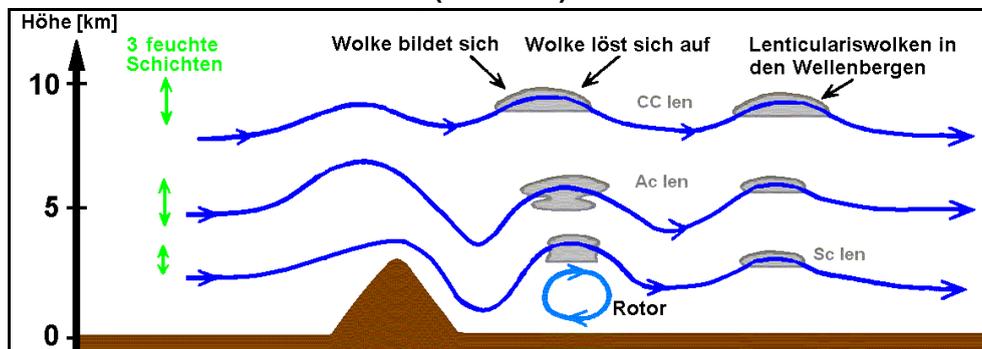
Wellenwolken der Art lenticularis zeigen häufig ein linsen- oder mandelförmiges Aussehen mit gewöhnlich deutlichen Umrissen. Sie entstehen am häufigsten in von orographischen Hindernissen ausgelösten Leewellen als Sc, Ac und Cc, können jedoch auch in Gebieten ohne Gebirgserhebungen beobachtet werden. Lenticularis-Wolken lassen sich nicht nur an ihrer charakteristischen Form, sondern auch daran erkennen, dass sie trotz des starken Höhenwindes mehr oder minder ortsfest über dem Gelände stehen.

Der Grund dafür ist, dass sie sich auf der Vorderseite eines Wellenberges durch den Hebungsprozess infolge Kondensation oder Sublimation immer wieder neu bilden, während sie sich durch das Absinken auf der Rückseite des Wellenkammes und die damit verbundene Verdunstung bzw. Eisverdunstung ständig wieder auflösen. Manchmal können Lenticularis-Wolken auch mit geringeren Geschwindigkeiten als die der Luftströmung driften, aber sie sind dann nur kurzlebig. Diese Wolkenart kann sich aber auch über flachem Terrain in Wellen ausprägen, die sich im Zusammenhang mit herannahenden Kaltfronten in der präfrontalen Warmluft entwickeln.

Werden Wellenwolken von einzelnen Hügeln oder Bergrücken ausgelöst, so ist meist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen ihnen und der Orographie feststellbar. Im allgemeinen jedoch ist das gebirgige Gelände wesentlich komplexer gegliedert und besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Hindernissen, die Lenticulariwolken erzeugen können. Das Himmelsbild sieht deshalb oft chaotisch aus und eine direkte Beziehung zwischen Lenticularis-wolken und dem verursachenden Gebirgsrelief lässt sich kaum oder gar nicht herstellen.

Lenticularis-Schichtwolken (Abb. 23)

Quelle : [6]



2.2.2.2.5.1 Sc len

Im Gegensatz zu Rotorwolken entstehen orographische Lenticulariswolken meist in einer laminaren Wellenströmung, so dass sie im allgemeinen deutlich ausgeprägte, glatte Umrisse aufweisen. Dieses gilt besonders für Lenticulariswolken der mittleren und hohen Troposphäre. In tieferen Schichten jedoch werden Form und quasistationäre Natur dieser Wolken weniger augenfällig, da hier häufig zusätzliche Bewölkung auftritt und die Strömungsverhältnisse teilweise sehr kompliziert sind. In der Tat modifiziert die Wellenströmung die bereits vorhandenen tiefen Wolken, so dass im Bereich der Wellentäler nahezu ortsfeste wolkenfreie Räume oder Streifen entstehen, und/oder dunklere Wolkenfelder die Wellenberge der Leewelle markieren.

2.2.2.2.5.2 Ac len

Im mittleren Wolkenstockwerk zeigen Lenticulariswolken die typische, auffallende linsen- bzw. mandelartige Form mit den glatten Umrissen. Besonders markant ausgeprägt lassen sich einzelne Wellenwolken bei relativen Luftfeuchten von 30 bis 60 % beobachten, weil in diesem Fall die Wolkenbildung nur im Bereich der maximalen Aufwindregionen der Welle stattfindet.

Wie bereits erwähnt, sind die glatten Wolkenränder einer Lenticulariswolke ein Indiz dafür, dass die Strömung laminar ist. Scharf abgegrenzte obere Wolkenränder entstehen dabei immer dann, wenn über der Wolke in der Umgebungsluft der Wasserdampfgehalt abnimmt. Falls dort ein markanter, plötzlicher Rückgang der Luftfeuchte zu verzeichnen ist, so wie es an Inversionen der Fall sein kann, wird die Wolkenobergrenze als klar umrissener, nahezu den Stromlinien der Luft folgender Bereich sichtbar. Bei einer allmählichen Abnahme des Wasserdampfgehaltes oberhalb des Wolkengipfels dagegen ist dieser konvexer gekrümmt als die Stromlinien.

Betrachtet man die Wolkenuntergrenze, so sieht sie mehr oder weniger abgeplattet aus, wenn der vertikale Feuchtegradient unterhalb der Basis gering ist. Mitunter hat die Untergrenze auch eine konkave Form, dann nämlich, wenn der Wasserdampfgehalt der Luft dort markant abnimmt.

Manchmal tritt an den Rändern von hohen, glatten Wellenwolken Irisieren auf, dass wahrscheinlich auf die Brechung der Sonnenstrahlung an sehr kleinen, stark unterkühlten Wassertröpfchen zurückzuführen ist.

Gelegentlich zeigen Lenticulariswolken eine zusätzliche wellenförmige Struktur, deren Wellenlänge allerdings wesentlich geringer als die der Leewellen ist. Die relevanten Faktoren, welche die Ausprägung von diesen undulatus-Formen fördern, sind die vertikale Windscherung und die Labilität. Die Scherung kann durchaus eine Folge der allgemeinen Strömungsverhältnisse sein, aber gewöhnlich ist sie ein Produkt der Wellenbewegung.

2.2.2.2.5.3 Cc len

Große, aus Eiskristallen bestehende lenticulare Bögen sind keineswegs ungewöhnlich und vor allen Dingen über großen Gebirgsmassiven wie den Alpen anzutreffen. Wenn sie sich bei kräftigen Leewellen ausbilden, gleichen sie in ihrem Erscheinungsbild und Umrissen von nicht irisierendem Ac len, zeigen aber die typische faserige Struktur von Eiswolken.

Bisweilen tritt im Tropopausenbereich in Verbindung mit Leewellen mäßige bis starke Turbulenz auf, die ab und zu im Aussehen der Wolke sichtbar wird.

Cirrocumulus lenticularis bildet sich nicht nur im Bereich von Hochgebirgen, wie durch eine ganze Reihe von Beobachtungen über den Britischen Inseln nachgewiesen wurde, sondern auch Hügel von nur 300 m Höhe können Wellen im Tropopausenniveau auslösen, deren Amplitude genügend groß ist, um Wolken zu erzeugen. Sehr häufig sogar ist die vertikale Versetzung der Luft in dieser Höhe essentiell mächtiger als das Hindernis, das die Welle erzeugt.

2.2.2.3 Dicke stratiforme Wolken und Schichtwolkensysteme

Zu den dicken stratiformen Wolken zählen vertikal mächtige Wolken der Gattung Ns und As aber auch Wolken des Typs Sc str op und Ac str op. Schichtwolkensysteme stellen die räumlich umfangreichste Bewölkung dar und setzen sich aus mehreren einzelnen stratiformen Wolken mit unterschiedlich hohen Untergrenzen zusammen. Aus ihnen fallen im allgemeinen die räumlich und zeitlich ausgedehnten Niederschläge der mittleren Breiten und in diesen Gegenden treten Schichtwolkensysteme meist in Verbindung mit sich entwickelnden Tiefdruckgebieten oder im Bereich ihrer Tiefausläufer (Fronten) auf, also dort, wo ausreichend großräumige Hebungsprozesse stattfinden.

Der interessierte Beobachter, der ein sich näherndes Schichtwolkensystems in Augenschein nimmt, bemerkt deshalb häufig eine Folge von Wolken in der Form Cs - As - Ns, oder Ac - AcAs - Ns, bis tiefere und dickere Wolken ihm die Sicht auf die höheren verdecken.

Cs besteht aus Eiskristallen, die Halo-Erscheinungen hervorrufen können und ist in der hohen Troposphäre zu finden. Falls zu schwere Eisteilchen die Wolke verlassen sollten, so erreichen sie den Erdboden aufgrund der hohen Wolkenbasis nicht. Befindet sich allerdings eine Ac-Schicht unterhalb des Cs, so können diese Eiskristalle in die unterkühlte, mittelhohe Wasserwolke hineinfallen und wachsen und dann den Erdboden als Niederschlag erreichen.

As setzt sich aus unterkühlten Wassertröpfchen und Eisteilchen zusammen, die häufig in Form von Schneeflocken vorhanden sind, so dass bei einer Wolkenmächtigkeit von etwa 1000 m tagsüber die Sonnenscheibe gerade noch - wie durch Mattglas - zu erkennen ist (As tr).

As kann aber auch so dick sein, dass die Sonne völlig verdeckt wird (As op). Halo-Erscheinungen treten dabei meist nicht auf, da die zur Brechung und Reflexion notwendigen Eiskristalle nicht vorhanden sind. Niederschläge sind, je nach Jahreszeit, in Form von Regen, Schnee oder Eiskörnern möglich.

Der Ns, ein weiter entwickelndes Stadium des Altostratus, besitzt eine große vertikale Mächtigkeit von häufig mehreren Kilometern, verdeckt immer die Sonne und hat seine Basis im tiefen Stockwerk. Aus diese Wolkengattung fällt anhaltender Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Eiskörnern.

Anstatt eines einzelnen, vertikal mächtigen Wolkensystems können aber auch mehrere dünnere Wolkenschichten vorhanden sein, die ein typisches Merkmal der Randbereiche von ausgedehnten, mit Zyklonen verbundenen Wolkenkomplexen darstellen. Gewöhnlich tritt dabei Cs und As im Zusammenhang mit einer tieferen durchbrochenen Ac-Schicht auf.

2.2.3 Cirriforme Wolken

Cirriforme Wolken setzen sich aus Eiskristallen zusammen und entstehen in der Regel durch Sublimation des Wasserdampfes in wolkenfreier Luft, aber auch aus Fallstreifen (virga) der Gattungen Ac und Cc. Weil bei den in der hohen Troposphäre vorhandenen niedrigen Temperaturen der Sättigungsdampfdruck klein ist, bilden sich aufgrund des geringen Wasserdampfgehaltes der Luft nur dünne, zarte, immer durchscheinende Wolken, die Sonne oder Mond nicht verdecken.

Unmittelbar nach seiner Entstehung tritt Ci scharf abgegrenzt in Erscheinung und weist oft deutliche Bäusche auf, unter denen größere Eiskristalle schleppenartig absinken. In dieser Phase besteht die Möglichkeit, dass wenige winzige, unterkühlte Wassertröpfchen vorhanden sind, die aufgrund der tiefen Temperaturen schnell gefrieren und anschließend als Sublimationskerne agieren. Ältere Ci-Wolken dagegen zeigen ein mehr diffuses und ungleichmäßiges Aussehen.

Cirriforme Wolken (Tab. 35)

Gattung		Art	Unterart	Sonderform
Cirrus	Ci	fib, unc, spi	*	0

Die Klassifikation ist nicht vollständig.

* : in der Wolkenklassifikation vorhanden, aber nicht in dieser Tabelle, da hier ohne Bedeutung

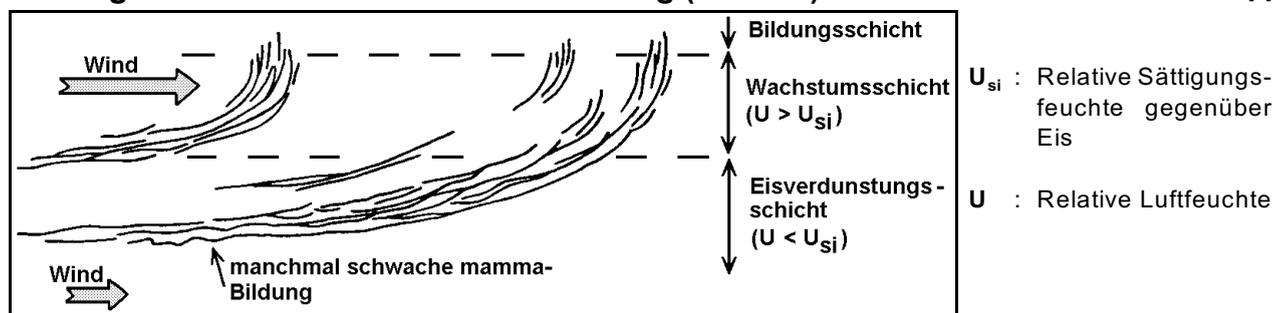
Die meisten cirriformen Wolken bilden sich bei geringen Aufwindgeschwindigkeiten, die in der Nähe von sich entwickelnden Tiefdruckgebieten auftreten, wenn sie durch eine hoch-troposphärische horizontale Massendivergenz verursacht.

Cirrus-Untergrenzen befinden sich im allgemeinen in Höhen zwischen 8 und 11 km, aber etwa 10 % der Wolken treten auch oberhalb von 13 km auf.

Flugzeugbeobachtungen ergaben, dass Ci-Schichten unregelmäßige Unter-, aber markante, flache Obergrenzen aufweisen, so dass die Dicke der Wolke unterschiedlich groß ist.

Bildung von Ci bei vertikaler Windscherung (Abb. 24)

Quelle : [6]



Wenn die Eiskristalle innerhalb der Wolke durch das Sublimationswachstum so groß geworden sind, dass sie von den schwachen Aufwinden nicht mehr getragen werden, beginnen sie sich langsam abwärts zu bewegen.

Gelangen sie dabei in eine Luftschicht, in der die Untersättigung gegenüber der festen Phase herrscht, so setzt Eisverdunstung ein und ihre sichtbare Fallstrecke endet (s. Abb. 24). Bei günstigen Bedingungen entstehen dadurch mehrere Kilometer lange Ci-Bänder, deren Form von der Windscherung abhängig ist.

Cirrus-Wolken, die einen ausgeprägten 'Kopf' oder Büschel und einen faserigen 'Schweif' aufweisen, werden als Ci unc, und diejenigen, die nur aus einigen mehr oder weniger gekrümmten Fasern bestehen, als Ci fib bezeichnet. Dichte cirriforme Bewölkung dagegen wird Ci spi genannt.

2.3 Künstliche und Wolken in der höheren Atmosphäre

2.3.1 Künstliche Wolken

Zu den künstlichen Wolkenbildungsprozessen zählen alle Vorgänge, die durch den Eingriff des Menschen in die Natur oder durch Naturkatastrophen hervorgerufen werden. Dazu gehören:

- Kondensations- oder Kondensstreifen,
- Wolken über Kühltürmen,
- Brandwolken,
- Wolken bei Vulkanausbrüchen.

2.3.1.1 Kondensationsstreifen

Kondensationsstreifen oder Kondensstreifen (s. Wolkenatlas S. 240, 241), die über Langen aufgrund des hohen Luftverkehrsaufkommens im Luftstraßenkreuz Frankfurt (G 1, G 31, B 1, A 9) sehr häufig zu beobachten sind, entstehen durch die Verbrennung von Flugzeugkraftstoff, einer Kohlenwasserstoffverbindung. Bei diesem Vorgang wird als Nebenprodukt Wasserdampf erzeugt, der durch die starke, überwiegend adiabatische Abkühlung der heißen Abgase hinter dem Triebwerk sofort kondensiert. Inwieweit Kondensstreifen beständig erhalten bleiben oder sich wieder auflösen, hängt vom Wasserdampfgehalt und der Lufttemperatur im Entstehungsniveau ab.

Bei Lufttemperaturen im Flugniveau von unter -35 °C gefrieren die unterkühlten Tröpfchen dann unmittelbar nach ihrer Entstehung und bilden Kondensstreifen, die in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte im Bildungsniveau mehr oder minder lange sichtbar sind. Bei einem Wasserdampfgehalt, der mindestens dem Sättigungswert in Bezug auf Eis entspricht, lösen sie sich meist nicht mehr auf und können sich durch Windscherungen weiter horizontal und/oder vertikal ausbreiten.

Bei höheren negativen Werten als -35 °C nimmt mit steigender Temperatur die Wahrscheinlichkeit zu, dass die unterkühlten Wassertröpfchen verdunsten, bevor sie gefrieren. Je nach dem, ob der Wasserdampfgehalt in Flughöhe dann gering oder hoch ist, zeigt sich dann kein, nur ein kurzzeitiger oder sogar ein dauerhafter Kondensstreifen.

Frisch entstandene Kondensstreifen sehen leuchtend weiß aus und können so dicht sein, dass sie auf tiefer liegende Wolken Schatten werfen.

Anfangs zeigen Kondensstreifen oft auch noch unten gerichtete Quellformen, und bei labiler Schichtung entwickeln sich aus der Obergrenze zinnenförmige Auswüchse.

Beständige Kondensstreifen treten am häufigsten als Ci fib in Erscheinung und zahlreiche verwehte Kondensstreifen können - wie im Frankfurter Raum oft beobachtet werden kann - eine geschlossene Wolkenschicht bilden, die als Cs zu melden ist.

Bei fast gesättigtem Wasserdampf werden auch kurzlebige Kondensstreifenwirbel an Flugzeugen sichtbar, die sich von Luftschrauben oder den Enden von Tragflügeln ablösen.

Kondensstreifen im Großraum Frankfurt/Main am 20.09. 2003 (Abb. 25)

Quelle : [12]



2.3.1.2 Wolken über Kühltürmen

Durch die wasserdampfreiche und warme Luft von Kühltürmen bilden sich auch Kondensationsschwaden, die sich bei konvektivem Wetter zu beständigen Quellwolken entwickeln können.

Im VFR-Bulletin der DFS wird z.B. oft eine Flugwarnung für den Kühlturm des Kraftwerkes Neckarwestheim (49 02 34 N, 09 10 42 E) mit einer Höhe von 55 m herausgegeben, die auf Turbulenzen und hinweist und zusätzlich beinhaltet, dass die aufsteigende Warmluft erst ab 6000 ft msl in Form einer Quellwolke bis 10000 ft sichtbar wird.

2.3.1.3 Brandwolken

Durch die enorme Hitzeentwicklung und deshalb extreme Thermik können über Großbränden Quellwolken entstehen, die mit Verbrennungsrückständen angereichert sind und deshalb grau und dunkel aussehen. Aus ihnen kann ein leichter Regenschauer und bei Bränden noch größerer Dimension, wie z.B. im 2. Weltkrieg, können auch stärkere Wettererscheinungen auftreten.

2.3.1.4 Wolken bei Vulkanausbrüchen

Wolken, die sich über aktiven Vulkanen ausbilden, haben im allgemeinen das Aussehen von kräftig entwickelten Cumuluswolken mit schnell wachsenden Quelltürmen (s. Wolkenatlas S. 243). Sie können sich in großer Höhe über weite Gebiete ausbreiten und Bishop-Ringe, d.h. farbige Ringe, die durch Beugung an Aerosolschichten entstehen, bewirken. Die durch Vulkanausbrüche verursachten Wolken bestehen hauptsächlich aus festen Partikelteilchen verschiedener Größe und beinhalten auch teilweise den Stoff Wasser. Der Vulkan 'El Chichon', der im Frühjahr 1982 in Mexiko ausbrach, schleuderte mehrere Millionen Tonnen SO_2 in die Stratosphäre. Dieser Vorgang zählt damit in Bezug auf die Menge des in die Stratosphäre geblasenen Materials zu den größten Vulkanausbrüchen dieses Jahrhunderts, jedoch sind die Katastrophen des Tampora (1815) und des Krakatau (1883) wahrscheinlich größer gewesen. Im August 1982 bedeckte die stratosphärische Wolke des 'El Chichon' in Schichten von der Tropopause bis 33 km Höhe die Erde zwischen 10°S und 30°N . Zu dieser Zeit hatte sich etwa die Hälfte des SO_2 zu Sulphaten, vor allen Dingen zu H_2SO_4 , umgewandelt (WMO, The World Climate Program Nr.4, 8.3.1983).

2.3.2 Wolken in der mittleren und hohen Atmosphäre

Wenn die Sonne morgens und abends einige Grad unter dem Horizont steht, lassen sich gelegentlich in nördlichen Breiten der Strato- und Mesosphäre Wolken beobachten, die sich durch ihre auffallenden Farben auszeichnen und von denen man annimmt, dass sie überwiegend aus Wasser bestehen.

2.3.2.1 Wolken in der Stratosphäre

Perlmutterwolken, die eigenartigsten und seltensten orographischen Wolken, treten mit linsenartigen, glatten Konturen in der Stratosphäre in Höhen von etwa 21 und 30 km bei Temperaturen von unter -80 °C auf und wurden bisher im Winter über Norwegen, Schottland, Island und Alaska bei einer kräftigen, breiten, hochreichenden und homogenen westlichen bis nordwestlichen Strömung beobachtet (s. Wolkenatlas S. 237, 238).

Diese Wolken sind nahezu stationär oder bewegen sich wie Lenticularis-Formen nur wenig. Weil sie nur bei gleichzeitigem Auftreten von starken troposphärischen Lee-Wellen zu finden sind, entstehen sie wahrscheinlich an stratosphärischen Wellen, die durch dynamische Vorgänge in der Troposphäre ausgelöst werden.

Tagsüber gleichen Perlmutterwolken blassen Cirruswolken, aber nach Sonnenuntergang heben sie sich, in den prächtigsten Farben glänzend, markant vom dunklen Firmament ab. Ihre Farbgebung und Helligkeit ist von wesentlich kräftiger Ausprägung als das lokale Irisieren, das häufig an den Rändern troposphärischer Wasserwolken, wie z.B. von Alen, beobachtet wird. Perlmutterwolken zeigen ihre intensivste Färbung, wenn die Sonne einige Grad unter dem Horizont steht. Mit weiter fortschreitender Dämmerung sind sie immer kontrastreicher am Nachthimmel wahrzunehmen, und ihre anfängliche Farbvielfalt wechselt über orange zu rosa. Noch später bekommen diese Wolken einen Grauschimmer, danach erscheinen die Farben in verminderter Intensität kurzzeitig wieder, ehe sie dann endgültig verschwinden.

Ab etwa zwei Stunden nach Sonnenuntergang treten Perlmutterwolken deutlich als dünne, graue Wolken am Firmament hervor und sind bei Mondlicht die ganze Nacht zu erkennen. Vor Sonnenaufgang wiederholt sich dann dieser Prozess in umgekehrter Richtung. Sind außer Perlmutter- auch noch Cirruswolken präsent, so zeigen erstere auch dann noch ein hell leuchtendes Erscheinungsbild, wenn der Ci bereits grau aussieht.

Neueste Forschungen ergaben, dass diese früher auf der relativ dicht besiedelten Nordhalbkugel öfter beobachtet und als Perlmutterwolken bekannt gewordenen Erscheinungen auch in der winterlichen Antarktis im Bereich des kalten, polaren Tiefdruckgebietes entstehen. Sie werden deshalb auch als 'stratosphärische Polarwolken' bezeichnet und verursachen den starken Abbau der stratosphärischen Ozonschicht - der Schutzschicht vor der kurzwelligen UV-Strahlung - im Frühjahr über der Antarktis.

Es wird vermutet, dass diese Wolken neben Wassertröpfchen und Eiskristallen - wann die flüssige oder feste Phase auftritt, ist noch ungeklärt - auch Schwefel-, Salpeter- und Salzsäure enthalten. Chemische Reaktionen innerhalb der Wolken wandeln inaktive Chlor- und auch Bromverbindungen in bedeutend aggressivere Substanzen um, die dann mit Beginn der solaren Einstrahlung den Prozess des Ozonabbaues einleiten.

Diese Wolkenbildung und der Ozonverlust lassen sich jedes Jahr über dem Südpol beobachten.

Über dem Nordpol dagegen ist die Stabilität des Polarwirbels nicht so stark ausgeprägt und nur in den letzten Jahren haben sich dort Polarwolken gebildet.

2.3.2.3 Wolken in der Mesosphäre

Leuchtende Nachtwolken - ein dünner Wolkenschleier nahe der Mesopause - werden selten und ebenfalls nur im Sommer in Höhen zwischen 75 und 90 km in den nördlichen Gegenden der mittleren Breiten und in den südlichen Polarzonen beobachtet (s. Wolkenatlas S. 239). Weil sie nur im Sommer bei sehr tiefen Mesopausen-Temperaturen von weniger als -100 °C auftreten, wird angenommen, dass sie sich durch einen mesosphärischen Hebungsprozess bilden und aus Eiskristallen bestehen. Bei diesen extrem tiefen Temperaturen führen selbst geringste Mengen an Wasserdampf zur Übersättigung und Sublimation. Die bevorzugten Farben von leuchtenden Nachtwolken sind Horizonthöhe gold bis rotbraun in geringer, mit zunehmender Höhe verfärben sie sich und erscheinen im Zenit blausilbrig.

2.4 Wolkenauflösungsprozesse

Wolkenauflösende Vorgänge setzen ein, wenn der Wasserdampf bezüglich der flüssigen und festen Phase ungesättigt ist, so dass durch die beginnende Verdunstung oder Eisverdunstung nach und nach alle Wolkenelemente verschwinden können. Die dazu notwendigen dynamischen und thermodynamischen Prozesse laufen im wesentlichen genau gegensätzlich zur Wolkenbildung ab. Wolken können sich auflösen durch

- Sublimation in Mischwolken und Ausfallen von Wolken-/Niederschlagselementen,
- Erwärmung über den Tau- bzw. Reifpunkt und
- Mischung von Wolkenluft mit feuchter Umgebungsluft.

2.4.1 Sublimation in Mischwolken

Diese Art der Wolkenauflösung tritt in Mischwolken aber auch in unterkühlten Wasserwolken auf, die aus höheren Wolkenschichten mit Eiskristallen angereichert werden.

In Mischwolken oder in unterkühlten Wasserwolken, in die aus höheren Wolkenschichten Eiskristalle hineinfallen, herrscht Sättigung gegenüber den unterkühlten Wassertröpfchen und Übersättigung gegenüber den Eiskristallen. Dadurch wachsen die Eisteilchen durch Sublimation auf Kosten der verdunstenden unterkühlten Tröpfchen in ihrer Umgebung und beginnen auszufallen, wenn sie zu schwer geworden sind.

Bei einer geringen Anzahl von Eiskristallen in der Wolke bilden sich Fallstreifen (virga) und aus der Mischwolke wird eine weniger dichte unterkühlte Wasserwolke. Dieser Vorgang lässt sich relativ häufig beim Ac beobachten, der sich dadurch sogar mitunter vollständig auflösen kann.

Bei einer größeren Anzahl von Eisteilchen verdunsten die Wassertröpfchen laufend, während die dabei durch Sublimation wachsenden zu schweren Eiskristalle als Niederschlag ausfallen, so dass sich - bei nicht ausreichendem Wasserdampfnachschub und ungenügender Tröpfchenbildung durch die wolkenformenden Prozesse - der Mischwolkenbereich auflösen kann. Dadurch schrumpft z.B. der Cb nach dem Reifestadium im Endstadium zusammen. Bei nachlassenden Aufgleitvorgängen sind diese Vorgänge auch beim As und Ns zu beobachten.

Bei sehr vielen Eiskristallen und wenig unterkühlten Tröpfchen verdunsten diese umgehend, ohne zu einem wesentlichen Wachstum der Eiskristalle zu führen, so dass eine reine Eiswolke zurückbleibt (beim Cc zu beobachten).

2.4.2 Erwärmung von Wolkenluft über den Tau- bzw. Reifpunkt

Die Erwärmung von Wolken bis zur Auflösung erfolgt diabatisch und adiabatisch, wobei meist beide Prozesse an der Auflösung beteiligt sind.

2.4.2.1 Diabatische Erwärmung

Die diabatische Strahlungserwärmung durch die kurzwellige solare Strahlung ist aufgrund der hohen Wolkenalbedo gering. Trotzdem führt sie selbst über dem Meer zu einem Tagesgang der Inversionsbewölkung mit einem Maximum am frühen morgen und einem Minimum tagsüber.

Langwellige Strahlung (IR, Infrarot) dagegen wird von den Wolken fast restlos absorbiert. Die vom Erdboden am Tage zusätzlich abgegebene IR-Strahlung und der IR-Anteil der solaren Strahlung - Troposphäre → 99 % ca. im Wellenlängenbereich von 0.3 - 3 μm mit ca. 8 % UV, 45 % VIS und 46 % IR - sorgen im Laufe des Vormittags für eine fast vollständige Auflösung von dünner Inversionsbewölkung der Art Stratocumulus/Alto cumulus str pe.

Eine ähnliche Wirkung durch verstärkte IR-Absorption hat auch die Advektion dieser Wolken von kaltem über warmen Untergrund.

2.4.2.2 Adiabatische Erwärmung

Hauptsächlich lösen sich größere Wolkenkomplexe durch adiabatische Erwärmung in Absinkgebieten auf, die aus Kontinuitätsgründen als vertikale Ausgleichströmungen von Hebungsvorgängen der Luft in ihrer näheren oder fernerer Umgebung auftreten.

Beispiele für Absinkbewegungen (Tab. 36)

Turbulenz	Absinken herrscht im abwärts gerichteten Anteil der turbulenten Luftbewegungen; Im unteren Bereich der Turbulenzschicht vergrößert sich häufig dadurch die Taupunktdifferenz, so dass dort wolken- und nebelauflösende Prozesse wirksam werden.
Konvektion	Der absinkende Ast der Konvektionszirkulation hat als Folge wolkenfreie bzw. -verdünnte Räume um die Konvektionsbewölkung.
orographisches Absinken	Auf der Leeseite von Gebirgen sinkt die Luft ab, so dass dort föhnige Aufheiterungen oder Föhnklüften auftreten.
Höhenkonvergenz	Unterhalb einer Höhenkonvergenz sinkt die Luft ab.

2.4.3 Mischung von Wolkenluft mit feuchter Umgebungsluft

An den seitlichen Wolkenrändern und bei geschlossenen Schichtwolken an der Unter- und Obergrenze findet immer eine Durchmischung der Wolkenluft mit der Umgebungsluft durch Turbulenz und Entrainment statt. Dieser Effekt nimmt mit steigender Aufwindgeschwindigkeit zu und ist deshalb vor allem bei Quellwolken von Bedeutung.

Entrainment : Einbeziehen von feuchter oder ungesättigter Umgebungsluft an den seitlichen Rändern eines aufsteigenden Luftpaketes durch turbulente Durchmischung. Dieser Effekt tritt auf, wenn sich das Luftquantum relativ zu seiner Umgebung bewegt.

Die durch Entrainment eintretende Untersättigung an den Wolkenrandbereichen führt zu einer Verdunstung von Wolkenelementen und damit zu einem dauernden Substanzverlust der Wolke, der nur durch den Wasserdampfnachschub aufgrund des Hebungsprozesses ausgeglichen werden kann. Besonders kleine Quellwolken, deren Oberfläche relativ groß ist, haben deshalb im allgemeinen keine lange Lebensdauer, wenn der wolkenbildende Vorgang nachlässt bzw. zum Erliegen kommt.

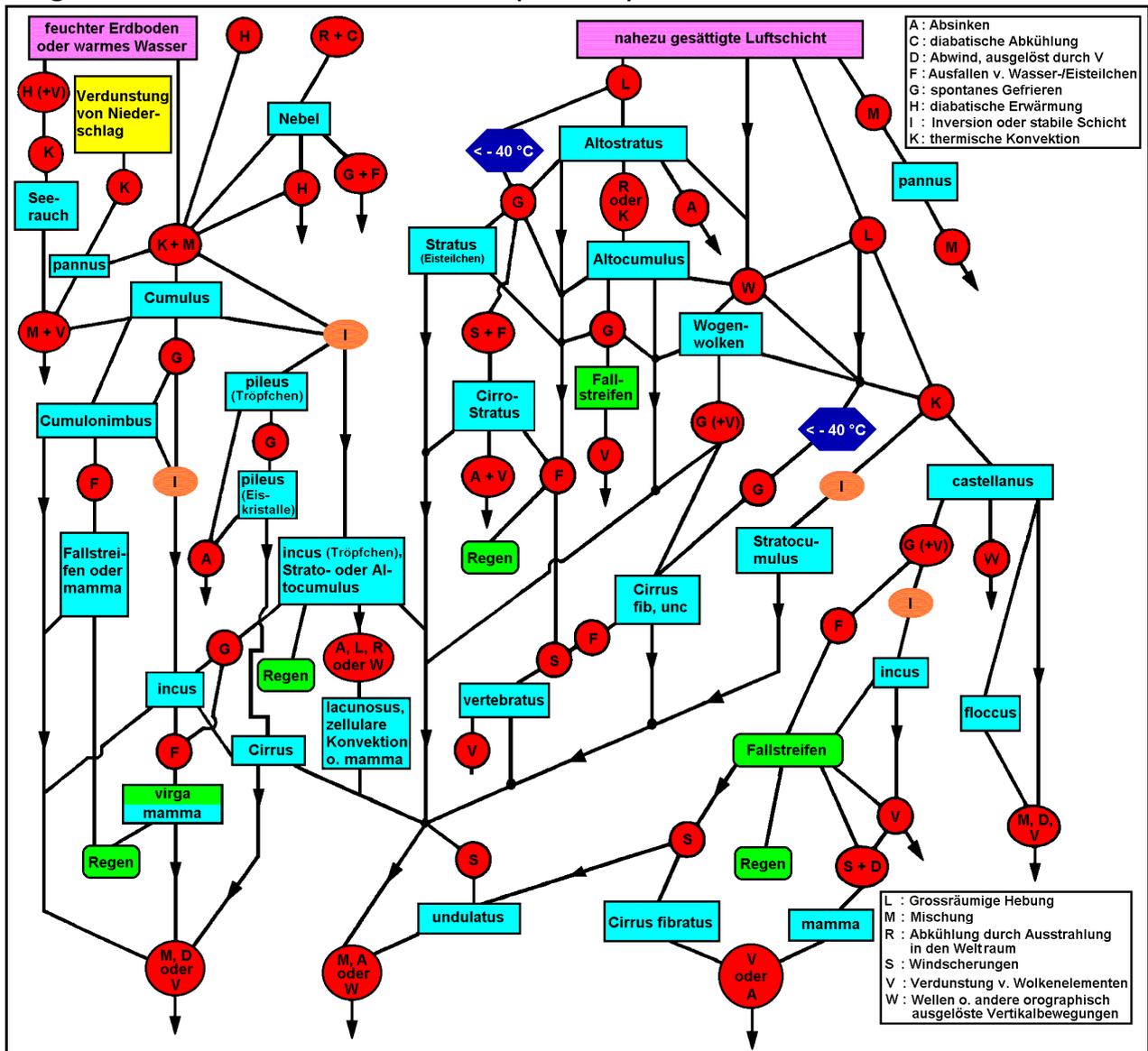
Cumuluswolken lösen sich darum abends mit schwächer werdender Thermik auf und dieser Vorgang ist besonders gut in einem trockenem Umfeld ausgeprägt. In feuchteren Schichten unter Inversionen halten sich dagegen Quellwolken am längsten und können sich dort sogar ausbreiten, so dass Sc oder Ac cumulogenitus entsteht.

Eiswolken verdunsten aufgrund der geringeren Sättigungsfeuchte über Eis langsamer als Wasserwolken, so dass der Amboss eines Cb lange als Überbleibsel sichtbar bleiben kann (Ci spi cumulonimbogenitus)

2.4.4 Diagramm der Wolkenmechanismen

Die Abbildung 26 zeigt ein Schema der komplexen troposphärischen Vorgänge und ihrer Wechselwirkungen, die zur Wolkenbildung und -auflösung führen.

Diagramm der Wolkenmechanismen (Abb. 26)



- A : Absinken
- C : Diabatische Abkühlung
- D : Abwindströme, die durch Abkühlung infolge Verdunstung entstehen
- F : Ausfallen von Wasser- und Eisteilchen
- G : Spontanes Gefrieren von unterkühlten Wolkenröpfchen nahe der Obergrenze einer sich entwickelnden Schauerwolke
- H : Diabatische Erwärmung (z.B. Aufheizung durch einen warmen Untergrund)
- I : Inversion oder stabile Schicht
- K : Thermische Konvektion in Wolken oder wolkenfreier Luft
- L : Großräumige Hebung (Aufgleiten)
- M : Mischung
- R : Abkühlung durch Ausstrahlung in den Weltraum
- S : Windscherungen
- V : Verdunstung von Wolkelementen in ungesättigter Luft
- W : Wellen oder andere orographisch ausgelöste Auf- und Abwärtsbewegungen der Luft

3. Nebelbildung und -auflösung

3.1 Nebelbildungsprozesse

Mit dem Begriff 'Nebel' werden bodennahe troposphärische Sichttrübungen bezeichnet, die durch schwebende, sichtbare Hydrometeore in flüssiger und/oder fester Form verursacht werden und eine Abnahme der horizontalen Bodensicht von unter 1000 Metern bewirken.

Intensität des Nebels (Tab. 37)

Intensität des Nebels	Horizontalsicht am Boden
leicht	≥ 500 und $VV < 1000$ m
mäßig	< 500 m und ≥ 200 m
stark	< 200 m

Nebel bildet sich durch Abkühlung unter den Taupunkt, Zunahme des Wasserdampfes durch Verdunstung, Mischung von feuchtwarmer mit kalter Luft und Kombination dieser Prozesse.

Aus diesen Vorgängen lassen sich die Hauptnebelarten ableiten, nämlich

- Abkühlungsnebel,
- Verdunstungsnebel,
- Mischungsnebel.

3.1.1 Abkühlungsnebel

Diese Nebelart entsteht durch Abkühlung der bodennahen Luftschicht unter den Taupunkt infolge

- nächtlicher Ausstrahlung des Erdbodens,
- Advektion von feuchtwarmer Luft über kalten Untergrund und
- orographischer Hebung.

Daraus ergeben sich die Klassen Abkühlungsnebel, Strahlungsnebel, Advektionsnebel und orographischer Nebel.

3.1.1.1 Strahlungsnebel

Strahlungsnebel bildet sich, wenn die Temperatur der Erdoberfläche durch nächtliche Ausstrahlung absinkt und, bedingt durch den turbulenten Wärmetransport, dann auch die bodennahe Luftschicht etwa in der Größenordnung von wenigen Metern bis zu einigen 100 m unter den Taupunkt abgekühlt wurde.

Orographisch begünstigte Gebiete für Strahlungsnebel sind feuchte Senken, Mulden oder Täler, die sich nachts oft mit der von den Hängen abfließenden Kaltluft füllen und damit regelrechte Kaltluftseen bilden, in denen durch weitere Strahlungsabkühlung Nebel entsteht.

Anzahl der Fälle mit Nebel in Nürnberg-Kraftshof [1956-1965] (Tab. 38)

Uhrzeit [MEZ]	M o n a t											
	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
00-01	2	1 3	3	2	2	2	3	3	21	28	17	7
01-02	3	18	1	3	8	5	3	5	23	36	16	13
02-03	3	19	3	5	8	7	4	6	23	40	17	11
03-04	3	19	3	12	8	9	6	7	30	42	19	11
04-05	4	17	8	18	14	11	10	16	36	44	21	13
05-06	2	15	14	20	12	9	9	17	37	48	20	13
06-07	6	16	19	14	8	7	7	16	33	53	21	13
07-08	9	19	12	11	4	4	2	7	24	42	23	11
08-09	8	15	9	6	1	2	1	2	16	29	18	13
09-10	15	15	7	1	-	1	-	1	11	17	10	10
10-11	13	1 1	3	1	-	-	-	1	2	9	4	9
11-12	7	4	-	-	-	-	-	-	1	2	2	7
12-13	3	4	1	-	-	-	-	-	-	-	3	6
13-14	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	3	4
14-15	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	3	7
15-16	3	1	1	-	-	-	-	-	-	-	2	11
16-17	3	2	-	-	-	-	-	-	-	1	3	8
17-18	3	5	1	-	-	-	-	-	-	2	5	6
18-19	3	5	-	-	1	-	-	-	1	5	3	6
19-20	5	7	-	-	2	-	-	-	5	5	6	5
20-21	5	8	3	2	2	-	-	-	4	10	10	8
21-22	5	1 0	3	3	-	-	1	-	8	13	11	6
22-23	5	1 0	4	2	1	-	1	2	12	21	11	4
23-24	4	1 2	5	2	-	1	1	1	16	26	11	7

Die Tabelle zeigt den ausgeprägten Tages- sowie Jahresgang des Nebels mit einem Tagesminimum in den Nachmittags- und Abendstunden und einem -maximum am Morgen sowie einem Jahresmaximum im Winter. Diese Tabelle enthält zwar alle Nebelarten, jedoch ist Strahlungsnebel am häufigsten vertreten.

Lange Nächte und tiefe Bodentemperaturen begünstigen diese Nebelart. Er ist darum im Winterhalbjahr häufiger als im Sommerhalbjahr ausgeprägt und tritt bevorzugt in Feuchtgebieten - Flusstäler, See- oder Sumpfgebiete - und nach Niederschlägen, wenn der Erdboden nass oder feucht ist, auf.

Häufig lässt sich im Spätherbst und Frühjahr beobachten, dass die Sicht im Nebel auch noch eine Stunde nach dem Erreichen des Temperaturminimums, das etwa eine halbe Stunde nach Sonnenaufgang eintritt, schlechter wird, oder dass die Sichttrübung sich erst zu diesem Zeitpunkt bildet. Der Grund hierfür ist die beginnende Einstrahlung und die damit verbundene Wasserdampfzunahme durch Verdunstung von Tau und die stärkere vertikale Durchmischung der bodennahen Luftschicht.

Die Tabelle 38 zeigt den ausgeprägten Tages- und Jahresgang des Nebels mit einem Tagesminimum in den Nachmittags- und Abendstunden und einem -maximum am Morgen sowie einem Jahresmaximum im Winter. Diese Tabelle enthält zwar alle Nebelarten, jedoch ist Strahlungsnebel am häufigsten vertreten.

Die wesentlichen Voraussetzungen für die Entstehung dieses Nebels sind

- wolkenloser Himmel oder geringe Bewölkung,
- schwache Luftbewegung und
- hoher Wasserdampfgehalt der bodennahen Luftschicht.

3.1.1.1.1 Wolkenloser Himmel oder geringe Bewölkung

Bei wolkenlosem Himmel oder geringer Bewölkung - Bedeckungsgrad weniger als 4/8 - ist das IR-Fenster offen, so dass sich der Erdboden besonders im Winterhalbjahr aufgrund der langen Nächte durch die große Wärmeabstrahlung des Erdbodens stark abkühlt.

3.1.1.1.2 Schwache Luftbewegung (1 - 4 m s⁻¹)

Bei Windstille oder bei Luftbewegungen von weniger als 1 m s⁻¹ bildet sich häufig nur Tau oder flacher Bodennebel, da aufgrund des geringen turbulenten Wärmeaustausches meist nur die dem Erdboden aufliegende Luftschicht von der Abkühlung erfasst wird.

Flacher Bodennebel : Nebelschicht mit einer maximalen vertikalen Mächtigkeit von ca. 2 m über Land und von etwa 10 m über See.

Mäßige und starke Luftbewegungen führen durch den großen vertikalen Austausch zur Nebelauflösung und bei höherer Luftfeuchte zur Ausbildung von Turbulenzwolken (Stratus oder Stratocumulus). Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 4 m s⁻¹ stellen damit die günstigsten Bedingungen zur Entwicklung von Strahlungsnebel dar.

3.1.1.1.3 Ausreichender Wasserdampfgehalt

Ist in der bodennahen Luftschicht genügend Wasserdampf vorhanden oder ist der Wasserdampfnachschub durch Verdunstung von feuchten Erd- oder von Wasseroberflächen groß genug, so kann bereits eine geringfügige Abkühlung zur Wasserdampfübersättigung führen. Die Feuchteabnahme der bodennahen Luftschicht infolge Kondensation des Wasserdampfes an der Erdoberfläche oder an Gegenständen in Bodennähe (Taubildung) verzögert jedoch zunächst die Nebelbildung, weil die Temperatur des Erdbodens eher unter den Taupunkt absinkt als die Lufttemperatur.

3.1.1.2 Advektionsnebel

Wird Luft über kälteren Untergrund geführt, so kühlt sich die dem Erdboden aufliegende Luftschicht durch den zum Boden gerichteten Wärmestrom ab. Bei stärkerem Wind (etwa 3 bis 7 m s⁻¹) kann dann durch turbulente Durchmischung auch eine mehr oder minder mächtige bodennahe Luftschicht von der Abkühlung unter den Taupunkt erfasst werden. Dieser sogenannte Advektionsnebel kann zu jeder Tageszeit auftreten und oftmals, aufgrund seiner großen vertikalen Mächtigkeit, tagelang anhalten. Seine Schichtdicke beträgt im allgemeinen einige 100, in extremen Fällen können aber durchaus 1000 m erreicht werden. Der Advektionsnebel ist damit die mächtigste und dauerhafteste Nebelart, der sich überwiegend im Winterhalbjahr ausbildet, wenn feuchte Warmluft in höhere Breiten gelangt und über kalten Wasseroberflächen oder dem kalten winterlichen Festland zur Ruhe kommt. Bei hoher Advektionsgeschwindigkeit der Luft kann sich zuerst eine Stratusschicht unter der Turbulenzinversion ausbilden, deren Untergrenze aber dann durch fortschreitende Abkühlung bis zur Erdoberfläche absinken kann, so dass eine mächtige Nebelschicht entsteht. Bevorzugte Bildungsräume sind kalte Meeresgebiete der höheren Breiten, Seegebiete mit großen Temperaturunterschieden wie im Bereich von kalten Auftriebswassern, Grenzzonen von warmen und kalten Meeresströmungen und Gebiete mit driftenden Eisbergen.

Auch in den Küstenbereichen der gemäßigten Breiten entwickelt sich in den Jahreszeiten, in denen die Temperaturoegensätze zwischen Land und Meer markant ausgeprägt sind, häufig Advektionsnebel. Dies ist einerseits im Frühjahr der Fall, wenn feuchte, erwärmte Festlandsluft auf das noch kalte Wasser übertritt. Andererseits entsteht im Herbst und Winter Küsten-Landnebel bei aufländiger Strömung, der jedoch meist nur in einem schmalen Band entlang der Küste ausgeprägt ist, während der Küsten-Seenebel dagegen häufig wesentlich weiter seewärts reicht.

3.1.1.3 Orographischer Nebel

Strömt wasserdampfreiche, ungesättigte, stabil geschichtete Luft gegen den sanft ansteigenden Hang eines Hügels oder Berges, so führt die adiabatische Abkühlung bereits nach einem nur geringfügigen Hebungsprozess zur Abkühlung unter den Taupunkt und Kondensation. Dadurch kann sich in Abhängigkeit von der Form und räumlichen Ausdehnung des Hindernisses ein mehr oder weniger mächtiger Stratus oder Hochnebel ausbilden, so dass oberhalb des Hebungs-kondensationsniveaus (HKN) trübes Wetter herrscht. Diese Nebelart entsteht besonders im Herbst oder Winter auf der Luvseite von Hindernissen, weil dann das HKN häufig sehr tief liegt.

Bei sehr niedrigem HKN kann der orographische Nebel oder Hangnebel den Talboden erreichen und so das ganze Tal ausfüllen. Zu beachten ist allerdings, dass die thermische Schichtung sehr stabil sein muss, da durch die erzwungene Hebung bei geringerer Stabilität das Niveau der freien Konvektion erreicht wird (bedingte bzw. latente Labilität), so dass sich dann kräftige Quellbewölkung ausbildet.

3.1.2 Verdunstungsnebel

Verdunstungsnebel entwickelt sich häufig durch Evaporation eines warmen und sehr feuchten Untergrundes, so dass die bodennahe Luftschicht mit Wasserdampf kräftig angereichert wird und durch gleichzeitig ablaufende geringfügige Abkühlungsprozesse nachfolgend Übersättigung und Kondensation ausgelöst werden. Auch an Fronten kann durch den ausfallenden Niederschlag gelegentlich Nebel entstehen.

3.1.2.1 Seerauch

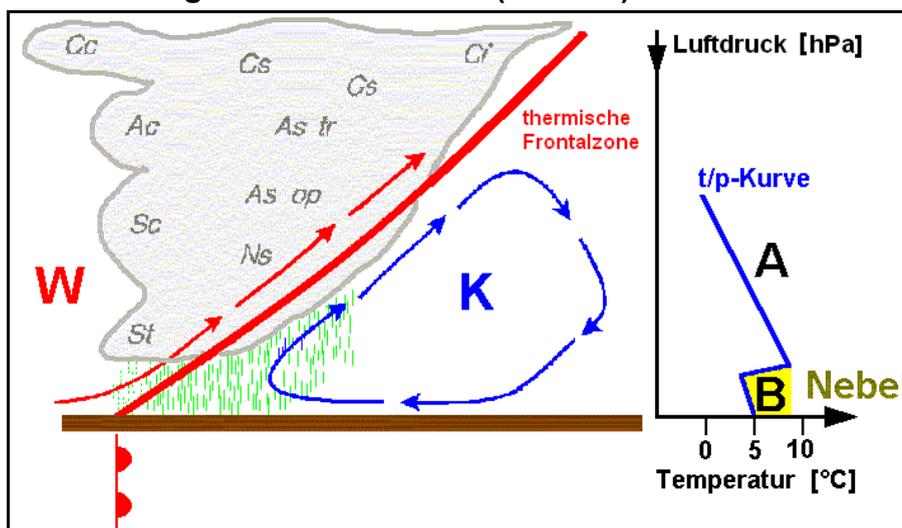
Sehr häufig kann man im Herbst und Winter über der warmen Oberfläche eines Sees oder Flusses nicht hochreichende, wallende Nebelschwaden beobachten, die dem aufsteigenden Rauch eines Biwakfeuers bei stärkerem Wind ähneln.

Seerauch entsteht, wenn große Temperaturunterschiede und damit ein starkes Taupunktgefälle zwischen dem warmen Wasser und der Luft vorhanden sind, das eine stürmische Verdunstung zur Folge hat. Die durch den warmen Untergrund ausgeprägte, flache labile Schichtung führt zur Ausbildung von Konvektionsströmen, so dass die Nebeltröpfchen schon bald nach ihrer Entstehung im Aufwindbereich wieder Verdunsten.

3.1.2.2 Niederschlags- oder Frontnebel

Niederschlagsnebel entsteht, wenn eine warme, sehr feuchte Bodenluftschicht durch kalten Niederschlag unter den Taupunkt abgekühlt wird. Manchmal bildet sich auch Nebel an Fronten durch Verdunstung des Niederschlages. Fällt z.B. an Warmfronten warmer Regen in den bodennahen Kaltluftkeil, so steigt durch die starke Verdunstung der Wasserdampfgehalt der Luft an. In Verbindung mit Hebungsvorgängen oder Turbulenz kann dieser Prozess dann zum Auftreten von Nebel führen.

Niederschlags- oder Frontnebel (Abb. 27)



Thermische Frontalzone einer Warmfront mit Bewölkung, Relativbewegungen der Warm- und Kaltluft und einem schematischer TEMP unmittelbar vor der Bodenfront

Fällt warmer Regen aus der wärmeren Schicht oberhalb der Inversion (A) durch die kältere Schicht (B), verdunsten Wassertröpfchen, so dass dort Nebel entstehen kann.

3.1.3 Mischungsnebel

Diese Nebelart, die manchmal bei Warmfrontpassagen zu beobachten ist, entsteht wohl kaum allein durch horizontale Mischung von warmer, wasserdampfreicher und feuchtkalter Luft, da das horizontale Temperaturgefälle selten die erforderliche Größe aufweist. Mit Sicherheit ist dieser Prozess ohne vertikale Durchmischung undenkbar, so dass adiabatische Vorgänge eine Rolle spielen und häufig auch noch die Verdunstung beteiligt ist.

3.2 Nebelauflösung

3.2.1 Nebelauflösung in der Natur

Folgende Prozesse führen in der Natur zur Auflösung von Nebel :

- Erwärmung über den Taupunkt,
- Feuchteabnahme durch Sublimation des Wasserdampfes an der Erdoberfläche,
- Mischung von Nebelluft mit ungesättigter Luft.

3.2.1.1 Erwärmung über den Taupunkt

Erwärmung über den Taupunkt wird hervorgerufen durch

- Einstrahlung,
- Advektion von Nebel über wärmeren Untergrund und
- adiabatische Erwärmung.

3.2.1.1.1 Einstrahlung

Die Erwärmung der Nebelluft durch Sonneneinstrahlung erfolgt nur sehr langsam, da ein großer Teil der solaren Strahlung aufgrund der hohen Albedo des Nebels an der Nebeloberseite reflektiert wird.

Der geringe Restanteil der Strahlung wird zum Teil in der Nebelschicht absorbiert, so dass Nebeltröpfchen verdunsten, und teilweise durch diffuse Reflexion von der Obergrenze des Nebels bis zum Erdboden transmittiert. Dadurch erwärmt sich der Erdboden und über den turbulenten, vertikalen Wärmetransport auch die Nebelluft. Im Frühjahr und Herbst löst sich der Strahlungsnebel dadurch in den Morgenstunden überwiegend mehr oder minder rasch auf. Im Winter allerdings sind aufgrund der geringen Einstrahlung und negativen Strahlungsbilanz besonders Talregionen bei Hochdruckwetterlagen und einer vertikal mächtigen Nebelschicht, die sich nachts gebildet hat, auch tagsüber oft durch trübe, nasskalte Wetterverhältnissen gekennzeichnet.

Weiterhin vermag die erwärmende Wirkung langwelliger Gegenstrahlung von aufkommender Bewölkung vor allen Dingen auf Strahlungsnebel einen reduzierenden Einfluss ausüben.

3.2.1.1.2 Advektion von Nebel über wärmeren Untergrund

Wird Nebel aus seinem Entstehungsgebiet in Gegenden mit einer höheren Untergrundtemperatur verfrachtet, so kann sich der Nebel durch den turbulenten, vertikalen Wärmetransport vom Boden zur Luft zurückbilden.

3.2.1.1.3 Adiabatische Erwärmung

Hangabwärtsgerichtete Luftströmungen und die damit stattfindende adiabatische Erwärmung verhindern Nebelbildung oder führen zu seiner Auflösung.

3.2.1.2 Feuchteabnahme durch Sublimation

Bei relativen Luftfeuchten von weniger als 100 % kann bereits Reifbildung einsetzen, weil bei Temperaturen unter 0 °C der Sättigungswert über Eis geringer als über der flüssigen Phase ist. Dadurch nimmt der Wasserdampfgehalt der Luft ab.

Dieser feuchtereduzierende Prozess verläuft über einer geschlossenen Schneedecke bei tiefen Temperaturen besonders heftig ausgeprägt, so dass unter -10 °C selten unterkühlter Nebel entsteht. Aus demselben Grund löst sich über einer Schneedecke unterkühlter Nebel bei sehr tiefen Temperaturen zumindest in Bodennähe auf.

3.2.2 Künstliche Nebelauflösung an Flughäfen

Neben dem Gewitter ist Nebel eines der weltweit auftretenden meteorologischen Phänomene, der für die heutige moderne Verkehrsluftfahrt eine wirtschaftlich unangenehme aber für die Sicherheit auch gefährliche Wettererscheinung darstellen kann, besonders dann, wenn die Horizontalsicht im Nebel um den Bereich des Landeminimums schwankt.

Aus diesem Grunde werden global an vielen Großflughäfen Versuche unternommen, die Nebelgefahr durch den Einsatz technischer Hilfsmittel zu bannen. Folgende Verfahren der Nebelauflösung, Fog dispersial operations (DENEb) genannt, werden dabei angewandt:

- Einblasen von warmer Luft aus ausgemusterten Jet-Triebwerken, die entlang der Runway installiert sind, wie z.B. in Paris (LFPG);
- Versprühen von Propangas, das ein Ausfrieren der Nebeltröpfchen zur Folge hat;
- Einstreuen von Trockeneis von oben in die Nebelschicht, so dass Tröpfchen gefrieren und Wasserdampf auf dem Kohlendioxidschnee sublimiert.

Diese Methoden der Nebelbekämpfung werden wegen ihrer hohen Kosten nur an großen, hoch frequentierten Flugplätzen benutzt.

Entscheidend für die Anwendung eines der Verfahren sind dabei die stündlichen Betriebskosten.

4. Anhang: Wolken- und Nebelbilder

Quelle: [12]

Wolkengattungen

BTZ Langen Kr

Bez.	Abk.	Deutsche Bezeichnung	Allgemeines Aussehen
Cirrus	Ci	hohe Federwolke	isolierte Wolken, zarte Fäden, dichtere Flecken, weiß, faserig, seidiger Glanz
Cirrocumulus	Cc	hohe Schäfchenwolke	Flecken, Felder, Schichten, weiß, körnig gerippt
Cirrostratus	Cs	hohe Schleierwolke	weißlicher Schleier, faserig oder glatt
Alto cumulus	Ac	grobe Schäfchenwolke	weißliche bis graue Flecken, Felder, Schichten, mosaikartig, wogenförmig, Eigenschatten
Altostratus	As	mittelhohe Schichtwolke	blaugraue Schicht
Nimbostratus	Ns	Regen-Schichtwolke	graue bis dunkle Schicht
Stratocumulus	Sc	Schicht-Haufenwolke	graue, teils weißliche Flecken, Felder, Schichten, mosaikartig, wogenförmig, Eigenschatten
Stratus	St	niedrige Schichtwolke	durchweg graue, einförmige Schicht
Cumulus	Cu	Haufenwolke	Einzelwolke mit Vertikalentwicklung, bei scharfen Rändern glänzend weiß, teils blumenkohlartige Gipfel
Cumulonimbus	Cb	Schauer- und Gewitterwolke	vertikal sehr mächtige Wolke, Ränder schlierig, streifig; Gipfel glatt oder ausgefranst, gelegentlich amboßförmig; Basis dunkel, drohend aussehend

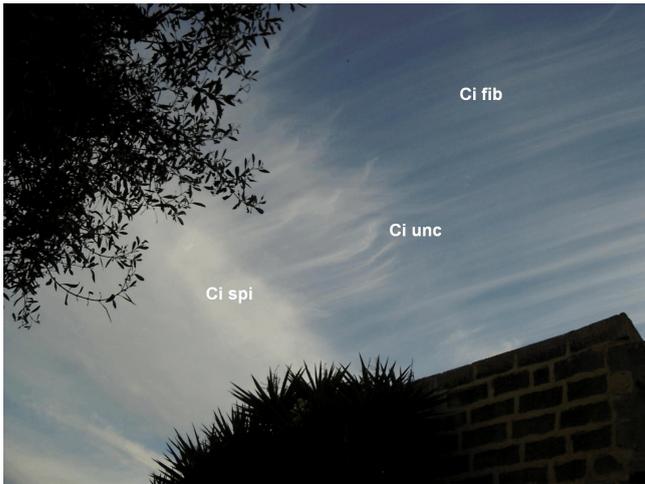
Wolkenarten

Lateinische Bezeichnung	Kurz-Beschreibung	Abkürzung
fibratus	faserig	fib
uncinus	haken-, krallenförmig	unc
spissatus	dicht	spi
castellanus	türmchenförmig	cas
floccus	flockig, bauschig	flo
stratiformis	schichtförmig	str
nebulosus	nebel-, schleierartig	neb
lenticularis	linsen-, mandelförmig	len
fractus	zerrissen	fra
humilis	niedrig	hum
mediocris	mittelmäßig entwickelt	med
congestus	aufgetürmt, mächtig aufquellend	con
calvus	kahl, glatt	cal
capillatus	behaart, ausgefranst, faserig	cap

Wolkenunterarten

Lateinische Bez.	Kurz-Beschreibung	Abkürzung
intortus	verflochten	in
vertebratus	skelett-, grätenförmig	ve
undulatus	wellen-, wogenförmig	un
radiatus	strahlenförmig, parallele Bänder oder Streifen	ra
lacunosus	durchlöchert (bienenwabenartig)	la
duplicatus	doppel- oder mehrschichtig	du
perlucidus	durchsichtig durch Lücken	pe
translucidus	durchscheinend	tr
opacus	nicht durchscheinend, dunkel	op

Wolkenbilder 1 und 2



Ci fib, Ci unc und Ci spi



Ci spi, Ci fib und Ci unc

Wolkenbilder 3 und 4

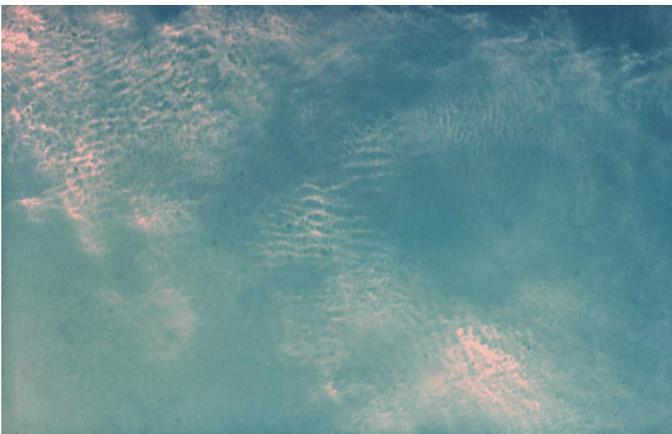


Ci spi mit Halo (Nebensonne; Sonne steht rechts außerhalb des Bildes)



Cs neb mit Halo (22°-Ring)

Wolkenbilder 5 und 6



Cc str un la



Ac str pe un

Wolkenbilder 7 und 8



Ac str



Ac flo mit Fallstreifen (vir)

Wolkenbilder 9 und 10



As tr



Ns pra (praecipitatio, mit Niederschlag)

Wolkenbilder 11 und 12



Sc str op (Schauer im Hintergrund)



Sc str

Wolkenbilder 13 und 14



Obergrenze St op im Rheintal, Ac len darüber



Cu hum, med

Wolkenbilder 15 und 16



Cu con



Cb cal

Wolkenbild 17



Cb cap inc

Nebelbilder 18 und 19



15.06.2005, 04.02 UTC,
BTZ Langen



Literaturverzeichnis

- [1] Braham, R.R. : *The cloud physics of weather modification; University of Chicago (USA)*
- [2] DWD : *Leitfaden Allgemeine Meteorologie; 1987*
- [3] DWD : *VuB 12, Internationaler Wolkenatlas, 2. Auflage, Offenbach/M 1990*
- [4] Knorr, H. : *Lehrunterlagen, WDS Langen*
- [5] Liljequist, G.H.,
Cehak, C. : *Allgemeine Meteorologie; 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, 1984*
- [6] Meteorological Office : *A Course in Elementary Meteorology; Second Edition,
Her Majesty's Stationery Office, London 1978*
- [7] WMO : *Compendium of Meteorology; WMO No. 364, Genf 1978*
- [8] WMO : *Handbook of meteorological forecasting for soaring flight;
2nd Edition, WMO No. 495, Genf 1993*
- [9] DWD : *Rundschreiben 5/1996 vom 9.12.1996; Einladung zur 1. Fachsitzung der Deutschen
Meteorologischen Gesellschaft e.V., Thema : Die Rolle von Polarwolken bei der
Zerstörung des stratosphärischen Ozons*
- [10] Berliner Wetterkarte
- [11] NASA : http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=2489
- [12] Wolken- und Nebelbilder : *Altmeyer, B., Becker, S.-M., Krutina, M., Schiller, S., Venzl, E.
im Anhang*