

Ausbildungsseminar WS 2009/2010: „Wetter und Klima“

3.3. Wolkenformen und Beitrag der Wolken zum Strahlungshaushalt

von Dominik Koch

Inhaltsverzeichnis:

1. Definition: Wolke

2. Wolkenklassifikation

2.1. Wolkenfamilien

2.2. Physikalische Einteilung

2.3. Wolkengattung

2.4. Arten und Unterarten

2.5. Sonder- und Begleitformen

2.6. Hebungsprozesse bei der Bildung der einzelnen Wolkengattungen

2.7. Wolken und ihre Wetterbedeutung

3. Beitrag der Wolken zum Strahlungshaushalt

3.1. Wolken erwärmen die Erde: Wasserdampf als natürliches Treibhausgas

3.2. Wolken kühlen die Erde

3.3. Einfluss der Aerosolkonzentration auf Wolken

Literaturverzeichnis

1. Definition: Wolke

Eine Wolke ist eine Ansammlung von kondensierten Wassertröpfchen oder sublimierten Eiskristallen, die in einigem Abstand zur Erdoberfläche in der Atmosphäre schweben. Anzutreffen sind Wolken hauptsächlich in der Troposphäre (8 km-18 km über Erdoberfläche, abhängig von Jahreszeit und geographischer Breite), teilweise auch in der Stratosphäre (10 km-50 km).

2. Wolkenklassifikation

Luke Howard (1772-1864), ein britischer Chemiker und Amateurmeteorologe beschäftigte sich als Erster mit einer Einteilung der Wolken in Klassen. Die heute gebräuchlichen lateinischen Namen in der internationalen Wolkenklassifikation gehen im Wesentlichen auf die in seinem 1803 veröffentlichten Essay „On the Modification of Clouds“ eingeführten Namen zurück.

Die heute verwendete Wolkenklassifikation ist im International Cloud Atlas niedergelegt, der von der World Meteorological Organization (WMO), eine Unterorganisation der UNO, immer wieder überarbeitet und neu herausgegeben wird. Das Werk dient als weltweit verwendetes Handbuch für die Wolkenbeobachtung. Die letzte Auflage stammt aus dem Jahr 1987. Von ihr hat der Deutsche Wetterdienst 1990 eine deutschsprachige Lizenzausgabe herausgebracht. An ihr orientieren sich alle folgenden Beschreibungen.

Das Aussehen der Wolken ist abhängig von der Art, Größe und räumlichen Verteilung der Wolkenelemente, von Eigenarten in ihrer Gestalt und der Lichtdurchlässigkeit, von der Anordnung der Wolkenteile sowie von der Intensität und Farbe des auf die Wolken fallenden Lichts (letzteres ist abhängig von der Stellung des Beobachters und der Sonne). Obwohl die Wolken auf Grund 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 WMO gliedert die Wolken deshalb in 4 **Familien**, 10 **Wolkengattungen**, 14 **Arten** und 9 **Unterarten** und einige **Sonderformen und Begleitwolken**.

2.1. Wolkenfamilien

Das erste Gliederungsmerkmal ist die **Wolkenfamilie**. Sie informiert über die Höhe in der sich eine Wolke aufhält. Als Kriterium für die Höhe wird dabei die Wolkenuntergrenze benutzt. Die Höhengrenzen sind so ausgewählt, dass jedes der sich ergebenden drei Wolkenstockwerke nur Wolken mit Wolkenelementen im gleichen Aggregatzustand besitzt. Die Begrenzung der einzelnen Wolkenstockwerke ist stark von der geographischen Breite und der Jahreszeit abhängig, so dass sich folgende Einteilung ergibt:

Wolkenstockwerk	Temperaturbereich	Physikalische Einteilung	Wolkenelemente
tiefe Wolken	$T > -10^{\circ}\text{C}$	Wasserwolken	nur Wassertropfchen
mittelhohe Wolken	$-35^{\circ}\text{C} < T < -10^{\circ}\text{C}$	Mischwolken	Wassertropfchen und Eisteilchen
hohe Wolken	$T < -35^{\circ}\text{C}$	Eiswolken	nur Eisteilchen

Wolkenstockwerk	Höhe [km]		
	polare Zone	gemäßigte Zone	tropische Zone
hohe Wolken	3 – 8	5 – 13	6 – 18
mittelhohe Wolken	2 – 4	2 – 7	2 – 8
tiefe Wolken	0 – 2	0 – 2	0 – 2

Die Untergrenze der Stockwerke ist der Erdboden und das tiefe Stockwerk besteht in allen 3 Zonen aus der planetarischen Grundschicht der Troposphäre, in der die thermischen und dynamischen Vorgänge hauptsächlich von Erdboden beeinflusst werden.

Die Obergrenze aller Stockwerke stellt die Tropopause dar, die in polaren Gegenden bei 8 km-10 km Höhe liegt, in den Tropen bei 16 km-18 km.

Die obige Zusammenstellung zeigt, dass **hohe Wolken** in Mitteleuropa eine Untergrenze von 5 km -13 km haben. Die Namen der zu dieser Familie gehörenden Wolken beginnen mit der Silbe „**Cirr**“.

Die Untergrenze der **mittelhohen Wolken** liegt in unseren Breiten bei 2 km-7 km. Die zu dieser Familie gehörenden Wolken beginnen mit der Silbe „**Alto**“ (lat. altus = hoch).

Tiefe Wolken reichen in den mittleren Breiten vom Erdboden bis zu 2 km Höhe. Diese Familie hat keine besondere Vorsilbe.

Zur vierten Familie gehören **stockwerkübergreifende Wolken**. Dazu zählen die Wolken, die die Stockwerksgrenzen sprengen. Sie können am Erdboden aufliegen (Wolkenuntergrenze 0 km) und bis in die Tropopause reichen, die bei uns in bis zu 13 km Höhe liegen kann. Die Namen der zu dieser Familie gehörenden Wolken enthalten die Silbe „**nimb**“ (lat. nimbus = Regenwolke).

2.2. Physikalische Einteilung

Wolken im Temperaturbereich größer als -10°C sind reine **Wasserwolken**, sofern nicht Eiskristalle aus höher gelegenen Schichten hineinfallen oder sehr gute Gefrierkerne ein frühzeitiges Kristallisieren vereinzelter unterkühlter Tröpfchen einleiten. Wasserwolken bestehen, wie bereits der Name verrät, ausschließlich aus kondensiertem Wassertröpfchen und sind deshalb im untersten Wolkenniveau zu finden. Im Durchschnitt besitzen die Wassertröpfchen einen Radius zwischen $1\mu\text{m}$ und $10\mu\text{m}$. Von allen Wolken haben sie die größte Konzentration an Wolkenelementen. Diese liegt in der Größenordnung von 100 Wassertröpfchen pro Kubikzentimeter, kann aber bei extrem schneller Wolkenbildung und neu entstandenen Wolken um einiges größer sein. Ein Grund dafür ist, dass in unteren Luftschichten die Anzahl an Kondensationskernen erheblich größer ist als in höheren. Neben diesem Faktor hat noch die Wolkenbildungsgeschwindigkeit bzw. Abkühlungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Tröpfchenkonzentration in der Wolke. Langsame Wolkenbildungsprozesse, wie beispielsweise Aufgleitvorgänge von warmen Luftschichten mit geringer Vertikalgeschwindigkeit im Bereich cm/s und Abkühlungsprozesse durch Wärmeabstrahlung, werden zu einer geringen Tröpfchendichte führen, denn bei ihnen kommt es nur zu einer unwesentlichen Wasserdampfübersättigung, so dass die vielen kleinen, weniger günstigen Kondensationskerne nicht mehr aktiviert werden können.

Dagegen führt ein spontaner Wolkenbildungsprozess wie die Konvektion mit Aufwindgeschwindigkeiten von mehreren m/s zu einer erheblichen Übersättigung, so dass noch zahlreiche schlechter geeignete Kondensationskerne am Kondensationsprozess teilnehmen können und die Wolke dadurch eine größere Dichte an Wassertröpfchen aufweist. Bei gleichem Wasserdampfgehalt führt eine schnelle Abkühlung also zu vielen kleinen Wassertröpfchen, ein langsamer Abkühlungsprozess hingegen zu wenigen aber dafür größeren Wassertröpfchen.

Dichte Wasserwolken weisen eine geringere Lichtdurchlässigkeit auf und erscheinen deshalb als grau. Die Wolkenränder sind scharf gezeichnet und leuchtend weiß, da einfallendes Sonnenlicht gut reflektiert wird. Weniger dichte Wasserwolken lassen mehr Licht durch und erscheinen heller als dichte Wolken. An den Rändern sind sie unscharf, diffus. Auftreffendes Sonnenlicht dringt hier stärker ein, es wird weniger zurückgestrahlt und die Wolkenränder wirken weißlich-grau.

Die Wolken im Temperaturbereich von -10°C bis -35°C bestehen nicht ausschließlich aus einer Art von Wolkenelementen. Man nennt sie deshalb **Mischwolken**. Sie können neben Wassertröpfchen und Eiskristallen auch Schneesternchen und bei stärkerer Vertikalbewegung Graupel- und Hagelkörner enthalten. Die Konzentration der Wolkenelemente liegt zwischen der von reinen Wasserwolken und reinen Eiswolken. In Mischwolken ist die Lichtdurchlässigkeit gering, die Farbe reicht von hellgrau bis dunkelgrau. Die Wolkenränder im Mischwolkenbereich sind diffus, der Gesamteindruck ist schlierig, streifig, milch-grau.

Reine **Eiswolken** bilden sich erst unter -35°C . Sie bestehen aus Eiskristallen in Form von sechseckigen Säulen oder Plättchen, wobei Prismen überwiegen. Die Form der Eiskristalle ist abhängig von der Temperatur. Die Anzahl der Wolkenelemente ist in Eiswolken auf Grund des geringen Wasserdampfgehalts der Luft bei diesen tiefen Temperaturen erheblich kleiner als in Wasserwolken und beträgt 100 Eiskristalle pro Kubikmeter. Im Gegensatz zu Mischwolken haben Eiswolken eine sehr gute Lichtdurchlässigkeit. Die Wolken erscheinen weiß und seiden glänzend. Die Wolkenränder sind ausgefranst und diffus.

2.3. Wolkengattung

Das zweite Gliederungsmerkmal ist die **Wolkengattung**. Sie legt die prinzipielle Wolkenform innerhalb der einzelnen Familien fest.

Man unterscheidet dabei drei grundlegende Formen: haufenförmig, schichtförmig und schleierförmig.

Die Namen der haufenförmigen Wolken enden stets auf „**cumulus**“ (lat. Ansammlung, Haufen). Es handelt sich dabei um Einzelwolken in Form von oft mehr vertikal als horizontal entwickelte Haufen.

Die schichtförmigen Wolken enden auf „**stratus**“. Dabei handelt es sich um einförmige Schichtwolken ohne wesentliche Helligkeitsunterschiede und Konturen in ausgedehnten Feldern oder Schichten, die den Himmel ganz oder teilweise bedecken.

Schleierförmige Wolken gibt es nur im Bereich hoher Wolken.

Aus diesen drei grundlegenden Formen ergeben sich die 10 Wolkengattungen, die einander ausschließen. Eine Wolke kann also nur einer Gattung angehören.

Nachstehend sind alle Wolkengattungen gemäß dem Karlsruher Wolkenatlas angeführt:

Cirrus (Ci):

Cirruswolken sind reine Eiswolken, d.h. sie bestehen ausschließlich aus Eis- und Schneekristallen und befinden sich damit im Stockwerk der hohen Wolken. Cirren treten als kleine Flecken, Büschel oder in Form schmaler faden- oder faserförmiger Bänder auf, die geradlinig, unregelmäßig gebogen oder scheinbar regellos miteinander verflochten sind. Sie sehen manchmal wie ein Komma aus und enden in Hakenform. Sie erscheinen zart, weiß, und haben einen



seidigen Glanz. Die deutsche Bezeichnung für die Cirrus-Wolke ist *hohe Federwolke*. Infolge ihrer geringen vertikalen Ausdehnung weisen sie keine dunklen Schattenstellen auf und meist bleibt durch sie hindurch der blaue Himmel sichtbar.

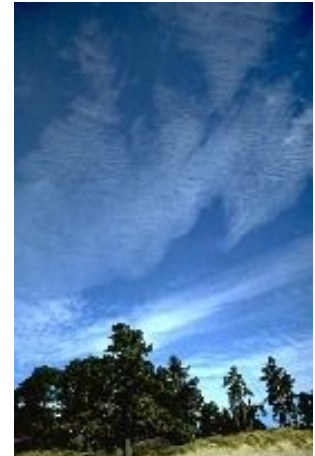
Cirrus kann gelegentlich in Flecken auftreten, die schwach grau aussehen, die die Sonne verschleiern, ihre Umrisse undeutlich werden lassen oder sogar verdecken. Seltener erscheint der Cirrus in Gestalt von isolierten, kleinen, runden Büscheln mit Schleiern oder als kleine abgerundete Türmchen oder Zinnen, die aus einer gemeinsamen Basis herauswachsen.

Steht die Sonne in Horizontnähe, wirkt Cirrus weißlich, während tiefere Wolken einen gelben oder orangenen Farbton annehmen. Sinkt die Sonne unter den Horizont, färbt sich der hoch am Himmel stehende Cirrus gelb, dann rosa, rot und zuletzt grau. Cirrus in Horizontnähe hat häufig eine gelbliche oder orangene Farbtonung, die bei tiefer stehenden Wolken weniger ausgeprägt ist. Häufig kommt es zu Haloerscheinungen. Unter diesem Begriff versteht man Lichtbögen am Himmel, die durch Reflexion und Brechung des Sonnenlichts an Eiskristallen entstehen. Voraussetzung für Haloerscheinungen sind möglichst regelmäßig gewachsene (hexagonales Gitter) und klar durchsichtige Eiskristalle. Allerdings erscheinen bei Cirrus wegen der geringen Ausdehnung der Wolken die kreisförmigen Halos kaum als geschlossener Ring.



Cirrocumulus (Cc):

Cirrocumulus besteht fast ausschließlich aus Eiskristallen, stark unterkühlte Wassertröpfchen verschwinden meist rasch zugunsten der Eiskristalle. Diese Wolkengattung befindet sich ebenfalls im Stockwerk der hohen Wolken. Cirrocumulus zeigt sich in dünnen, weißen Flecken, Feldern oder Schichten von Wolken ohne Eigenschatten, mehr oder weniger regelmäßig angeordnet. Diese sind sehr klein, körnig oder gerippt und isoliert, die Wolkenteile können aber auch miteinander verwachsen. Cirrocumulus tritt vielfach in mehr oder weniger ausgedehnten Feldern mit ausgefranstem Rändern auf, aber auch in linsen- oder mandelförmigen Bänken, häufig langgestreckt und mit scharf ausgeprägten Umrissen. Gelegentlich erkennt man in den Cirrocumulusfeldern mehr oder weniger regelmäßig verteilte kleine, runde Lücken mit vielfach ausgefranstem Rändern, die an ein Netz oder eine Honigwabe erinnern. Die Einzelteile der Wolken bestehen manchmal aus sehr kleinen, unten zerfetzten Büscheln, oder weisen sehr kleine turmartige Quellungen auf, die aus einer gemeinsamen horizontalen Basis herauswachsen. Cirrocumulus ist gut lichtdurchlässig. Manchmal sind Haloerscheinungen sichtbar. Die deutsche Bezeichnung für Cirrocumulus ist *hohe Schäfchenwolke*. Sie lässt sich verhältnismäßig selten beobachten.



Cirrostratus (Cs):

Auch die Cirrostratus-Wolken (*hohe Schleierwolke*) bestehen hauptsächlich aus Eiskristallen und sind im hohen Wolkenstockwerk angesiedelt. Sie sind lichtdurchlässig und erscheint als weißlicher



Wolkenschleier mit faserigem oder glattem Aussehen. Der Himmel ist ganz oder teilweise bedeckt und im Allgemeinen sind Haloerscheinungen zu beobachten. Cirrostratus bildet sich, wenn ausgedehnte Luftschichten langsam gehoben werden. Als Aufzugsbewölkung kündigt er vor der Herannahen einer Warmfront, er nimmt rasch zu und kann in kurzer Zeit den ganzen Himmel überziehen.

In der Cirrostratusbewölkung treten dünne Streifenbildungen auf oder sie sieht wie ein nebelartiger Schleier aus. Der Rand ist manchmal scharf abgegrenzt, meist aber cirrusartig ausgefranst. Der Wolkenschleier kann gelegentlich so dünn sein, dass nur durch auftretende Haloerscheinungen auf sein Vorhandensein geschlossen werden kann.

Altostratus (As):

Die Altostratus-Bewölkung besteht überwiegend bzw. fast immer aus Wassertröpfchen, nur bei sehr niedrigen Temperaturen kommen auch Eiskristalle vor. Sie erscheinen als weiße und/oder graue Flecken, Felder oder Schichten, die im Allgemeinen einen Eigenschatten haben. Diese bestehen aus schuppenartigen Teilen, Ballen oder Walzen und sehen manchmal zum Teil faserig oder diffus aus oder sind zusammengewachsen. Die meist ausgedehnten Felder der einzelnen Wolkenanteile haben die Form lang gestreckter, paralleler Walzen, die durch scharf begrenzte, wolkenlose Bahnen voneinander getrennt sind. Sehr selten beobachtet man auch kleine, mehr oder weniger regelmäßig verteilte und mit fransenartigen Rändern versehene Lücken, die das Aussehen eines Netzes oder einer Honigwabe hervorrufen. Die Wolkenfelder kommen häufig gleichzeitig in zwei oder mehr Höhen vor. Bei Altostratus ist die Stellung der Sonne zu sehen, er kann diese aber genauso völlig verdecken.

Altostratus (*grobe Schäfchenwolke*) entsteht meist am Rande einer ausgedehnten Luftschicht im mittleren Wolkenstockwerk.



Altostratus (As):

Altostratus (*mittelhohe Schichtwolke*) besteht aus Eiskristallen und Wassertröpfchen, auch Regentropfen und Schneeflocken können vorhanden sein. Diese Wolkengattung beschreibt eine Mischwolke und befindet sich also im Bereich der mittelhohen Wolken. Beim Altostratus handelt es sich um graue oder bläuliche Wolkenfelder oder -schichten von streifigem, faserigem oder einformigem Aussehen, die den Himmel ganz oder



teilweise bedecken. Sie sind stellenweise gerade so dünn, dass die Sonne wenigstens schwach wie durch Mattglas hindurch scheinen kann. Die dickeren Teile verdecken die Sonne völlig. Es treten keine Haloerscheinungen auf. Altostratus hat zumeist eine große horizontale Ausdehnung (mehrere 100 km) im Gegensatz zur vertikalen Erstreckung (mehrere 1000 m). Oft tritt er in zwei oder mehreren übereinander liegenden Schichten auf, die bisweilen miteinander verwachsen sein können und nur eine geringe Höhendifferenz haben.

Gelegentlich beobachtet man Wellenbildung oder breite, parallele Bänder. Niederschlag kann in Form von Fallstreifen (*virga*) fallen, die von der Wolkenuntergrenze herabhängen, und der Wolke manchmal ein warzenartiges oder zerrissenes Aussehen geben. Wenn der Niederschlag den Boden erreicht, handelt es sich meist um Dauerniederschlag von Schnee, Regen, Eiskörnern oder Frostgraupeln.

Stratocumulus (Sc):

Stratocumulus (*Schicht-Haufenwolke*) besteht aus Wassertröpfchen, manchmal sind gleichzeitig Regentropfen oder Reifgraupeln, seltener auch Schneekristalle und Schneeflocken vorhanden. Stratocumulus-Wolken gehören im Allgemeinen den Wasserwolken und damit den tiefen Wolkenstockwerk an, in Ausnahmefällen, z.B. bei Temperaturen nahe -10°C im tiefen Wolkenstockwerk, sind sie auch als Mischwolken anzutreffen. Dann fällt in jedem Fall Niederschlag aus ihnen. Diese Wolkengattung tritt in grauen und/oder weißlichen Flecken, Feldern oder Schichten auf und hat fast stets dunkle Stellen. Sie besteht aus mosaikartigen Schollen oder Ballen und Walzen. Die Wolkenteile sind nicht faserig und können zusammengewachsen sein.



Beim Stratocumulus variieren Größe, Mächtigkeit und Gestalt sehr stark. Bisweilen kommen einzelne Wolkenteile in parallelen Walzen vor, die durch wolkenfreie Streifen voneinander getrennt sind, gelegentlich (vor allem in den Tropen) sieht man auch nur eine einzige große Walze (Walzenwolke). Sehr selten geben mehr oder weniger regelmäßig verteilte runde Lücken mit zumeist ausgefranzten Rändern der Wolke das Aussehen eines Netzes oder einer Honigwabe. Ebenfalls selten sieht man diese Wolkenart in Form lang gestreckter linsen- oder mandelförmiger Bänke mit deutlich abgegrenzten Umrissen oder in Form von Türmchen, die aus einer gemeinsamen horizontalen Basis herauswachsen. Die Lichtdurchlässigkeit zeigt beträchtliche Unterschiede. An manchen Partien ist die Wolke so dünn, dass die Stellung der Sonne erkennbar bleibt, in anderen Fällen wird die Sonne vollkommen verdeckt. Dunkle Stratocumulus-Schichten haben oft eine unregelmäßige Unterseite, gegen die sich einzelne Wolkenteile deutlich reliefartig abheben. Manchmal fällt Niederschlag in Form von Regen, Schnee oder Reifgraupeln; bei kaltem Wetter kann *virga*-Bildung aus Eiskristallen auftreten, an denen dann Haloerscheinungen sichtbar werden.

Stratus (St):

Stratus (*niedrige Schichtwolke*) besteht aus kleinen Wassertröpfchen, bei niedrigen Temperaturen auch aus kleinen Eisteilchen; ist die Stratus-Bewölkung dicht oder dick, enthält sie oft Sprühregentropfen, manchmal Eisprismen oder Schneegriesel. Bei Stratus sehen wir eine nebelartige, durchgehend graue und ziemlich einförmige Schicht. Die Unterseite liegt häufig so tief, dass die oberen Partien niedriger Hügel oder höhere Bauwerke bereits von den Wolken eingehüllt werden. (Im Beispielbild ragen die höheren Geländeteile schon wieder aus der Stratus-Schicht heraus). Die Unterseite ist meist klar abgegrenzt und kann Wellenformen aufweisen. Stratus erscheint bisweilen in Form von Teilwolken verschiedener Größe und Helligkeit, die mehr oder weniger zusammenhängen, auch in Form von Fetzen oder zerfetzten Schwaden, die ihre Gestalt rasch ändern. Ist der Stratus dünn, so bleiben die Umrisse von Sonne oder Mond klar erkennbar; bei sehr niedrigen Temperaturen unter Umständen Halo-Erscheinungen. Niederschlag fällt als Sprühregen, Schnee oder Schneegriesel.



Nimbostratus (Ns):

Nimbostratus-Wolken (*Regenwolken*) bestehen manchmal aus unterkühlten Wassertröpfchen, aus Schneekristallen oder aus einer Mischung der flüssigen und festen Teilchen.

Nimbostratus präsentiert sich als eine ausgedehnte, tiefliegende, graue und häufig dunkle Wolkenschicht mit vielfach diffuser Unterseite. Ihre vertikale Mächtigkeit dieser Mischwolken ist so groß, dass die Sonne nie sichtbar wird, sie reicht vom tiefen Wolkenniveau bis hinauf in das mittlere oder hohe. Es fällt anhaltender Niederschlag in Form von Regen, Schnee, Eiskörnern oder Frostgraupeln, der den Erdboden nicht unbedingt erreicht. An oder unter der Nimbostratus-Decke bilden sich häufig tiefer liegende zerfetzte Wolken (*pannus*), die ihre Gestalt rasch ändern und die Nimbostratus-Wolken ganz oder teilweise verdecken. Sie entstehen als Folge des Niederschlags und verdanken ihre Entstehung der Verdunstung und Wiederkondensation des gefallenen Niederschlags bei Turbulenzerscheinungen in der untersten Luftschicht. Der *pannus* bildet sich zunächst als isolierte Einzelwolken und kann später zu einer zusammenhängenden Schicht verschmelzen, weite Teile des Himmels bedecken und dann mit der Unterseite der eigentlichen Nimbostratus-Bewölkung verwechselt werden.



Cumulus (Cu):

Cumulus-Wolken (*Haufenwolken*) bestehen hauptsächlich aus Wassertröpfchen, darauf weisen auch die im Allgemeinen gut ausgeprägten Umrissformen hin; Eiskristalle kommen nur in den Teilen der Wolken vor, in denen die Temperatur deutlich unter 0°C liegt. Cumulus-Wolken sind isolierte, durchweg dichte und scharf abgegrenzte Wolken, die sich in der Vertikalen in Form von Hügeln, Kuppeln und Türmen entwickeln. Die von der Sonne beschienenen Teile erscheinen meist leuchtend weiß. Ihre Untergrenze ist verhältnismäßig dunkel und verläuft fast horizontal. Man beobachtet häufig mehrere Entwicklungsstadien gleichzeitig: Wolken von einer geringen vertikalen Ausdehnung sind meist abgeflacht, die mit einer mäßigen vertikalen Erstreckung weisen kleine Aufquellungen und emporschießende Teile auf während die quelförmigen Oberteile großer und mächtiger Cumulus-Wolken wie ein Blumenkohl aussehen. Die Ränder eines Cumulus erscheinen manchmal stark zerfetzt, und die Umrisse verändern sich ständig und rasch. Cumulus-Wolken organisieren sich manchmal in Reihen (Wolkenstraßen), die fast parallel zur Windrichtung liegen; vertikal sind sie dann gewöhnlich mäßig entwickelt. Im Allgemeinen bringt eine Cumulus-Bewölkung keinen Niederschlag (Schönwetter-Haufenwolken), lediglich wenn sie bis ins mittelhohe Niveau hinaufreicht und sich schon im Übergang zu einem Cumulonimbus befindet, kann es einen leichten Schauer geben.



Cumulonimbus (Cb):

Cumulonimbus-Bewölkung besteht aus Wassertröpfchen und aus Eiskristallen, die besonders im oberen Teil der Wolke vorkommen. Cumulonimbus-Wolken (*Schauer- und Gewitterwolken*) sind Wasser - bis Mischwolken. Daneben



enthalten sie große Regentropfen und häufig Schneeflocken, Reifgraupeln, Eiskörner und Hagelkörner. Die Wasser- und Regentropfen sind oft erheblich unterkühlt. Der Cumulonimbus erscheint als massige, dichte Wolke von beträchtlicher horizontaler und vertikaler Ausdehnung und erinnert mit seiner Form an einen hohen Berg oder einen mächtigen Turm. Die Ausmaße sind so groß, dass seine charakteristische Form sich dem Beobachter erst aus beträchtlicher Entfernung erschließt. Er reicht durch alle Wolkenstockwerke hindurch. Unter der sehr dunklen Wolkenuntergrenze befinden sich oft niedrige, zerfetzte Wolken (pannus), die mit der Hauptwolke zusammengewachsen sein können. Am Gipfel eines Cumulonimbus, der sich aus einem Cumulus weiterentwickelt, zeigen sich anfangs rundliche Quellungen, obwohl gerade seine oberen Teile die scharfen Umrisse bereits verlieren. Später kommt es zur völligen Umbildung des oberen Wolkenabschnittes in eine faserige, streifige Wolkenmasse, die oft wie ein Amboss aussieht. Bei sehr niedrigen Temperaturen kann die faserige Struktur vielfach den gesamten Wolkenkörper erfassen. Cumulonimben treten einzeln auf oder erscheinen aneinandergereiht wie eine riesige Mauer. Steht der Cumulonimbus über dem Beobachter, so sind die oberen Wolkenteile durch die ausgedehnte Unterseite oder niedrige Wolkenfetzen (pannus) nicht mehr erkennbar. Manchmal wächst ein Cumulonimbus mit Altostratus oder Nimbostratus zusammen oder entwickelt sich inmitten dieser Wolken. Der Eindruck, den ein Cumulonimbus (Gewitterwolke) vermittelt, ist meist ein unheilvoller. Dazu tragen Donner, Blitz, kräftige Regen-, Schnee- und Hagelschauer sowie Sturm- und Orkanböen bei. Die Cumulonimbus-Wolke geht aus fortgesetzten Umbildungsvorgängen aus einer gut und kräftig entwickelten Cumulus-Wolke hervor. Deshalb sind die Bedingungen, die zu großen Cumulus-Wolken führen, auch für die Bildung von Cumulonimben günstig.

2.4. Arten und Unterarten

Ein einziger Blick zum Himmel genügt, um sich klar zu machen, dass mit den 10 Wolken-gattungen die Formenvielfalt der Wolken auch nicht annähernd zu erfassen ist. Dazu sind noch viel weitergehende Differenzierungen nötig. Man erreicht sie durch Einführen von **Arten und Unterarten**.

Die insgesamt 14 Wolkenarten ermöglichen eine nähere Beschreibung der Höhe und der Ausdehnung (Volumen) der Oberflächenbeschaffenheit, der Gestalt und des inneren Aufbaus (Struktur) der Wolke.

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

Außerdem unterscheidet man 9 Unterarten, die Wolken nach ihrer Anordnung der Wolkenteile und ihrer Lichtdurchlässigkeit charakterisieren.

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Abkürzung
intortus	verflochten	in
vertebratus	skelett- und grätenförmig	ve
undulatus	wellen-, wogenförmig	un
radiatus	strahlenförmig	ra
lacunosus	durchlöchert (runde, ausgefranste Löcher)	la
duplicatus	doppel- oder mehrschichtig	du
perlucidus	durchsichtig durch Lücken	pe
translucicus	durchscheinend	tr
opacus	nicht durchscheinend	op

2.5. Sonderformen und Begleitwolken

Viele Wolken besitzen besondere Erscheinungen, die mit der Hauptmasse der Wolken oder auch getrennt davon auftreten können. Man nennt solche Erscheinungen **Sonderformen oder Begleitwolken**.

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Abkürzung
incus	mit Amboss	inc
mamma	mit beutelförmigen Auswüchsen an 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 Schlechtwetterfetzen	pan

2.6. Hebungsprozesse bei der Bildung der einzelnen Wolkengattungen

Damit sind alle Wolkenformen erklärt. Es bleibt nur die Frage offen, wie die einzelnen Wolkentypen entstehen.

Die Voraussetzung für die Bildung von Wolken ist das Aufsteigen (Hebung) von Luft. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Hebungsprozessen. Im Wesentlichen können Wolken auf zweierlei Weisen entstehen:

- Geordnete bzw. ungeordnete Hebung von Luftpaketen
- Großflächiges Aufgleiten von Luft

2.6.1. Ungeordnete Hebung

Unter ungeordneter Hebung versteht man eine Luftbewegung in der sich die Geschwindigkeit und die Richtung eines darin betrachteten Teilchens ständig ändern. Ungeordnete Hebung wird häufig auch als Turbulenz bezeichnet.

In Folge von Turbulenzen des Windes stoßen Luftpakete nach oben vor und kühlen sich dort adiabatisch ab. Gleichzeitig werden andere Luftpakete von oben unter adiabatischer Erwärmung nach unten geführt. Als Folge dieses ständigen Auf und Ab entstehen haufenförmige Wolken in allen Niveaus der Atmosphäre: Stratocumulus, Stratus, Altopcumulus, Cirroculumus. Die Wolkendecke wird durch diesen Hebungsprozess in eine große Anzahl kleiner Wolkenschollen oder hintereinander angeordnete Bänder zerteilt.

2.6.2. Geordnete Hebung

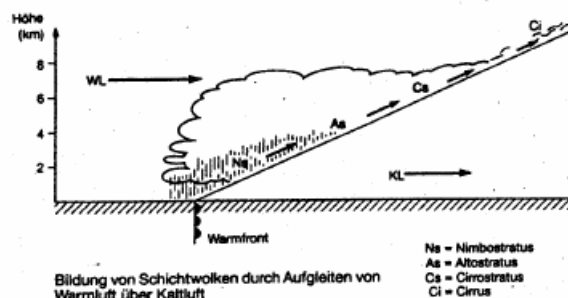
Als geordnete Hebung bezeichnet man das Aufsteigen von Luft durch Konvektion.

Das Aufheizen von Bereichen der Erdoberfläche über die Durchschnittstemperatur führt dazu, dass sich Luftpakete stark erwärmen, aufsteigen und eine Art Luftsäule bilden.

Ausgleichsprozesse nahe der Erdoberfläche mit der Umgebung schnürren die Luftsäule von unten her ab, so dass sich die abgeschnürte Luft als Warmluftblase von selbst nach oben in Bewegung setzt. Auf dem Weg nach oben kühlt sie sich ab und es entstehen Cumulus-Wolken oder Cumulonimbus-Wolken.

2.6.3. Aufgleiten

Bei großflächigem Aufgleiten schieben sich warme Luftmassen einer Warmfront keilförmig über kalte Luftmassen.



Die Aufgleitflächen sind meist sehr ausgedehnt (Länge und Breite mehrere 1000 km). Die Vertikalgeschwindigkeiten liegen im Bereich von einigen cm/s. Deshalb dauern diese Vorgänge häufig mehrere Tage. Die warmen Luftmassen kühlen sich auf ihrem Weg nach oben adiabatisch ab. Dieser Prozess führt zur Bildung von Schichtwolken wie Cirrus, Cirrostratus, Altostratus oder Nimbostratus.

Eine andere Art des Aufgleitens ergibt sich, wenn Luftmassen durch orographische Hindernisse wie z.B. Gebirge zum Aufgleiten gezwungen werden. Hieraus entstehen Cumulus oder Cumulonimbuswolken.

2.7. Wolken und ihre Wetterbedeutung

Jede Wolkengattung charakterisiert im Wesentlichen eine Wetterlage bzw. einen Wetterablauf. Deshalb sind sie häufig ein wichtiger Anhaltspunkt bei der Wettervorhersage. Im Folgenden sind die einzelnen Wolkengattungen und die Wetterlagen auf die sie hinweisen aufgeführt:

Cirrus:

Cirrus-Wolken weisen im Allgemeinen auf schönes Wetter hin.

- a) Stabiles Hochdruckgebiet:
Ziehen nur einzelne Felder von Cirren über den Himmel und ist dabei keine Verdichtungstendenz zu erkennen, bleibt das Wetter weiterhin schön, insbesondere wenn keine größeren Cirrostratusflächen zu sehen sind
- b) Aufzugsbewölkung:
Ziehen am Horizont großflächig Cirren auf, die nach ihrer Organisation sichtlich zusammengehören, deutet dies auf eine nahende Warmfront hin. Sind schon Cirrostratus-Wolken zu sehen, kann man davon ausgehen, dass ein Tief im Anzug ist.
- c) Gewitterlage:
Wenn sich eine Cumulonimbus-Wolke auflöst, geschieht dies an der Unterseite zuerst. Übrig bleiben Cirren, die zunächst durchaus relativ großflächig am Himmel bleiben können. Die Cirren verteilen sich im Allgemeinen rasch über den Himmel, was daraufhin deutet, dass das Wetter schön wird.

Cirrocumulus:

- a) Wetter wird schlechter:
Neigt sich eine sommerliche Schönwetterlage ihrem Ende entgegen, ziehen häufig ausgedehnte Cirrocumulus-Felder auf, in denen sich die einzelnen Wolken langsam vergrößern. Erscheint ein solches Wolkenbild, muss man in Kürze mit aufkommenden gewittrigen Schauern rechnen. Die Wetterlage wird für einige Zeit schlechter werden.
- b) Regen und kräftiger Wind:
Herrscht momentan noch schönes, sonniges Wetter, kommen aber aus westlicher Richtung größere Cirrocumulus-Felder auf, wird es bald regnen und dazu ein kräftiger Wind blasen.
- c) Kaltfront:
Die Kaltfront kann sich bei einer zu Ende gehende Föhlage durch kleine Cirrocumulus-Felder ankündigen. Normalerweise kommt die Kaltfront schnell.

Cirrostratus:

Cirrostratus ist eine Schlechtwetter-Eiswolke

- a) Cirrostratus verdeckt die Sonne:
Wenn die Sonne noch wenig getrübt vom blassblauen Himmel scheint, aber ein Halo sichtbar wird, ist eine Cirrostratusdecke aufgezogen, die ein Tief ankündigt. Wenig später wird die Sonne zunehmend verdeckt werden und am folgenden Tag wird im Zuge der Warmfront Regen einsetzen. Sobald die Sonne nicht mehr zu sehen ist, wird es im Allgemeinen nur noch wenige Stunden dauern bis es regnet.
- b) Regen:
Zieht der Cirrostratus sich schnell verdichtend und rasch auf und fällt dabei das Barometer, wird bald Regen fallen und eine Warmfront eintreffen.
- c) Gleichbleibendes Wetter:
Zeigen sich am Himmel nur einzelne kleine Cirrostratus-Felder oft auch zusammen mit einigen Cirren, so bleibt das Wetter erhalten, wie es gerade ist.

Altostratus:

In aller Regel werden große Flächen des Himmels von dieser Wolkengattung bedeckt. Wird mindestens etwa die Hälfte von ihnen eingenommen, muss mit einer Umstellung des freundlichen Wetters auf Schlechtwetter gerechnet werden.

- a) Gleichbleibendes Wetter:
Befinden sich nur einige Gruppen von Altostratus verstreut am Himmel und verändert sich das Bild insgesamt nicht, wird sich das Wetter in nächster Zeit nicht ändern.
- b) Langsame Wetterverschlechterung:
Erscheinen Altostratus zusammen mit Cirrostratus und zeigt sich eine Verdichtungstendenz, wird langsam eine Wetterverschlechterung auf längere Zeit eingeläutet.
- c) Gewitter kündigt sich an:
Ziehen die Wolken großflächig und in wellenförmiger Anordnung auf, besteht in den nächsten Stunden eine große Neigung zu Gewittern. Gleiches gilt, wenn Altostratus plötzlich zu großen Cumulus-Wolken aufquellen.
- d) Regen kommt:
Erscheinen Altostratus-Wolken, gefolgt von Altostratus, wird es in nächster Zeit zu regnen beginnen, meist mit viel Wind.

Altostratus:

Altostratus gehört zu den Schlechtwetter-Wolken. Im Normalfall erscheint er in der Folge von Cirrostratus-Wolken am Himmel. Verdichten sich Altostratus so stark, dass die Sonne nur noch diffus durchscheint, kommt regnerisches Wetter auf uns zu. Die Stärke, mit der die Sonne noch durch die strukturlose eintönige Wolke hindurchscheint, kann gut zur Vorhersage benutzt werden, wann der erste Regentropfen fallen wird. Erscheint die Sonne diffus, aber mit scharfen Rand durch die Wolken, bleiben im Allgemeinen ca. 8 - 10 Stunden bis Regen fällt. Deutet sich die Sonne nur noch durch eine Aufhellung im eintonigen Grau an, dauert es bis

zum Regenfall nur noch 4 - 8 Stunden. Ist die Sonne überhaupt nicht mehr zu sehen, kann es innerhalb kurzer Zeit regnen.

- a) Wetter bleibt gleich:
Ein dünner Altostratus bei Sonnenschein, ohne Verdichtungstendenz, bedeutet keine Wetterverschlechterung
- b) Eintreffende Warmfront:
Sich verdichtender großflächig aufziehender Altostratus weist auf eine bald eintreffende Warmfront hin.
- c) Schlechtwetter:
Dunkler Altostratus, der einzelne Wolkenteile erkennen lässt und Wolkenlücken aufweist, deutet auf länger andauerndes Schlechtwetter hin.

Stratocumulus:

Diese Wolkengattung steht am häufigsten und zu allen Jahreszeiten am Himmel. Sie zeigt eine stabile Schichtung an, bei der das Wetter so bleibt, wie es gerade ist.

Stratus:

Stratus kündigt im Allgemeinen Regen oder Gewitter an.

- a) Regen:
Bedeckt der Stratus den ganzen Himmel und setzen sich einzelne vom Wind erfasste Wolkenfetzen von der Gesamtmasse ab, muss man auf Regen gefasst sein.
- b) Gewitter:
Beginnt im Sommer eine Stratusdecke den Himmel zu verhüllen, liegt in der Regel die Begründung in der Zufuhr von feuchter und warmer Meeresluft. In der Folge muss man mit Gewittern rechnen.

Nimbostratus:

Nimbostratus ist typisch für eine Warmfront. Es ist eine Regenwolke. Je nach seiner Mächtigkeit fällt die Niederschlagsintensität aus. Im Mittelmeer ist er die den Scirocco begleitende ausgedehnte Wolke.

Cumulus:

Cumulus-Wolken können Unwetter anzeigen oder verkünden, dass das Wetter schön bleibt. Die Bilderbuchwolken sind vor allem im Sommer zu sehen, da sie ja durch Konvektion entstehen. Im Winter kommen sie selten vor und wenn, dann lange nicht so prächtig.

- a) Schönes Wetter bleibt:
Bei sommerlicher Hochdrucklage entstehen am Vormittag mit steigender Sonne die ersten kleinen Cumuli. Die Schönwetterwolken bleiben recht klein und ziehen locker verstreut über den Himmel. Am Abend lösen sich die Wolken auf Grund zurückgehender Konvektion auf.
- b) Wärmegewitter:
Quellen die Cumuli turmartig auf, was mit einer enormen Geschwindigkeit vonstatten gehen kann, ist dies ein sicheres Zeichen für ein binnen kurzer Zeit losbrechendes Gewitter.

c) Kaltfront

Ziehen am Horizont hoch aufgetürmte Cumuli auf breiter Front auf, naht eine Kaltfront. Sie ist in den meisten Fällen mit Gewittern verbunden, oft mehrere hintereinander in schwächer werdender Reihenfolge. Nach dem Durchzug der Kaltfront reißt die Bewölkung auf und in einiger Entfernung hinter der Front setzt die konvektive Bewölkung mit den Cumuli ein, die Regen- und Schneeschauer entlassen.

Cumulonimbus:

Diese Wolkengattung ist eine Gewitterwolke. Sie löst in der Regel kräftige Regenschauer, oft mit tischtennisballgroßen Hagelkörnern, aus.

3. Beitrag der Wolken zum Strahlungshaushalt der Erde

3.1. Wolken erwärmen die Erde: Wasserdampf als natürliches Treibhausgas

Wenn die Medien heute vom Treibhauseffekt sprechen, so ist damit immer der anthropogene Treibhauseffekt, der durch die Industrialisierung und der damit verbundenen Emission großer Mengen von CO_2 , Methan oder FCKW hervorgerufen wird, gemeint.

Man vergisst dabei, dass es auch einen natürlichen Treibhauseffekt gibt, der Leben auf der Erde erst möglich macht.

Man stelle sich zunächst vor, es gäbe keinen Wasserdampf und keine anderen natürlichen Treibhausgase in der Atmosphäre.

Dann würde die Sonne, die wichtigste Energiequelle der Erde, ein Körper mit einer Oberflächentemperatur von ca. 5500K, gemäß der Planck'schen Schwarzkörperstrahlung und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz vorwiegend kurzwelliges Licht im Bereich von 300nm bis 600nm, ausstrahlen.

Die Energie der kurzwelligen Sonnenstrahlung besitzt oberhalb der Erdatmosphäre einen Wert von 1368 Watt pro Quadratmeter. Diesen Wert bezeichnet man als Solarkonstante.

Die Erde erhält diese Solarstrahlung auf einer Fläche von πR_E^2 und hat eine Oberfläche von $4\pi R_E^2$, so dass nur ein Viertel der Solarkonstante auf die Erde fällt. (Die Albedo wird hier vernachlässigt.) Die Tatsache, dass genau genommen immer nur eine Halbkugel 12 Stunden lang mit der halben Solarkonstante von der Sonne beleuchtet wird, während die andere Hälfte auf der sonnenabgewandten Seite ist, wird hier durch die homogene Verteilung der Sonnenstrahlung auf die ganze Erdkugel berücksichtigt.

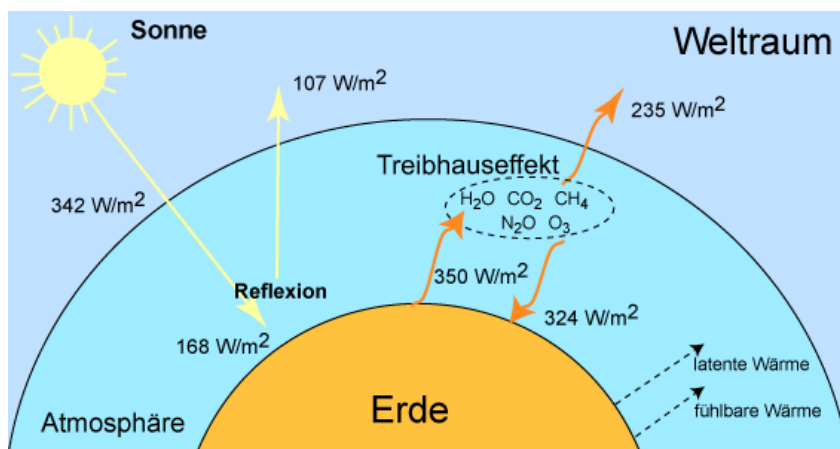
Die Sonne sendet also eine Leistung von 342 W/m^2 auf die Erde. Davon werden 31% bzw. 107 W/m^2 von der Erdoberfläche und der Atmosphäre in den Weltraum zurückreflektiert. Es verbleiben nur 69% bzw. 235 W/m^2 , die von der Atmosphäre (67 W/m^2) und der Erde (168 W/m^2) absorbiert werden und damit zur Erwärmung zur Verfügung stehen.

Das auf diese Weise erwärmte System Erde - Atmosphäre gibt die aufgenommene Energie entsprechend seiner gegenüber der Sonne deutlich geringeren Temperatur im langwelligen Infrarotbereich als Wärmestrahlung wieder ab. Die Energie der reflektierten Solarstrahlung und der emittierten Wärmestrahlung, muss genau der aufgenommenen Solarenergie entsprechen. Andernfalls würde die Erde sich stetig aufheizen bzw. abkühlen. Das heißt insgesamt, dass das System Erde - Atmosphäre die kurzwellige Solarstrahlung von 342 W/m^2 aufnimmt und die reflektierte Strahlung von 107 W/m^2 sowie die langwellige Wärmestrahlung von 235 W/m^2 an den Weltraum wieder abgibt. Würde die Realität diesem Prozess entsprechen, so ergäbe sich eine globale Durchschnittstemperatur von -18°C ! Leben auf der Erde wäre unmöglich.

Bei Strahlungsvorgängen in der Atmosphäre ist von entscheidender klimatischer Bedeutung, dass die langwellige Strahlung die von der Erde ausgesandt wird nicht sofort auf direktem Wege in den Weltraum entweicht. Sie wird von atmosphärischen Spurengasen, den natürlichen Treibhausgasen und den Wolken zunächst absorbiert. Die Wolken und Spurengase emittieren die aufgenommene Energie einerseits an den Weltraum und reflektieren sie andererseits wieder zur Erde zurück, die sich dadurch zusätzlich aufheizt und wieder langwellige infrarote Strahlung in Richtung Atmosphäre aussendet. Der Kreislauf beginnt von neuem.

In Zahlen ausgedrückt erhält die Erde eine effektive Strahlung von 492 W/m^2 , die sich zusammensetzt aus der oben bereits erwähnten Solarstrahlung von 168 W/m^2 und 324 W/m^2 atmosphärischer Strahlung durch den natürlichen Treibhauseffekt. Davon gibt sie 350 W/m^2 als Wärmestrahlung an die Atmosphäre wieder ab. Der Energieüberschuss von 142 W/m^2 wird zu einem geringen Teil (40 W/m^2) durch ein atmosphärisches Fenster (Wellenlängenbereich im IR der von der Atmosphäre nicht absorbiert werden kann) an den Weltraum abgegeben. Der Rest wird als fühlbare Wärme (24 W/m^2) und als latente Wärme (78 W/m^2) von der Erde abgegeben. Die latente Wärme wird durch Verdunsten von Wasser mittels Wasserdampf in die Atmosphäre transportiert, wo sie durch Kondensation wieder freigesetzt wird zu neuer Wolkenbildung beiträgt.

Durch die Existenz von Wolken (Wasserdampf) und anderer natürlicher Treibhausgase wie Ozon, N_2O , CO_2 , Methan (in geringen Mengen) und dem damit verbundenen natürlichen Treibhauseffekt erhöht sich die globale Durchschnittstemperatur von -18°C auf 15°C . Leben auf der Erde wird damit möglich.



Der Treibhauseffekt ist vor allem bei hohen, zerfransten Wolken wie z.B. Cirrus-Wolken von enormer Bedeutung. Diese Wolken lassen auf Grund ihrer geringen optischen Dichte und ihrem geringen Albedo (20% - 40%) die kurzwellige Sonnenstrahlung beinahe vollständig durch. Auf der anderen Hand befinden sich diese Wolken in extrem kalten Luftschichten, so dass sie genügend langwellige Strahlung der Erde aufnehmen können, bis ihre Strahlungsbilanz ausgeglichen ist. Deshalb erwärmt sich bei ihnen das System Atmosphäre-Erde stärker als bei tiefer liegenden, dichteren Wolken.

3.2. Wolken kühlen die Erde

Wolken besitzen nicht nur den Effekt, dass sie den Treibhauseffekt verstärken. Sie spielen auch bei der Kühlung der Erde die entscheidende Rolle.

Bei diesem kühlenden Prozess ist auf der einen Hand eine große Albedo, also ein großes Reflexionsvermögen der Wolken wichtig, denn dadurch wird ein Großteil der Sonnenstrahlung direkt reflektiert. Auf der anderen Hand sind warme Wolken günstig, denn sie strahlen mehr Energie in den Weltraum ab und speichern weniger Wärme. Bei warmen Wolken ist nämlich die Strahlungsbilanz gegenüber kälteren Wolken schneller im Gleichgewicht.

Diese Bedingungen sind am Besten bei Stratocumulus-Wolken erfüllt. Sie weisen eine Albedo Bereich von 70%-80% auf (zum Vergleich: Cirrus 20%-40%) und haben, als Bewohner des tiefen Wolkenstockwerks, durchschnittliche Temperaturen $> -10^{\circ}\text{C}$.

Messungen der NASA zeigen, dass im globalen Mittel die kühlende Wirkung der Wolken überwiegt.

Die Bilanz ist jedoch abhängig von der geographischen Breite: In Polargebieten überwiegt der erwärmende Effekt, während sich in den Tropen beide Effekte nahezu aufheben.

3.3. Einfluss der Aerosolkonzentration auf Wolken

Wissenschaftler haben in den letzten Jahren festgestellt, dass die Erhöhung der Aerosolkonzentration, d.h. die Erhöhung der Konzentration von in der Luft schwebenden Partikeln die als Kondensations- oder Sublimationskerne wirken können, einen Einfluss auf die Eigenschaften von Wolken hat. Unter den betroffenen Eigenschaften sind unter anderem Niederschlag, optische Dichte und Größe von Wassertröpfchen.

Der Einfluss der Aerosolkonzentration auf Wolken lässt sich in fünf Effekte gliedern.

Leider sind diese Effekte bis heute noch nicht genau erforscht und werden von den Wissenschaftlern überhaupt nicht oder nur in Bruchstücken verstanden, denn die Effekte interferieren miteinander und basieren alle auf komplexen Vielteilchensystemen.

Deshalb sind die im Folgenden angeführten Effekte „mit Vorsicht“ zu betrachten, denn es handelt sich zum Teil nur Annahmen, die bislang noch nicht bewiesen wurden.

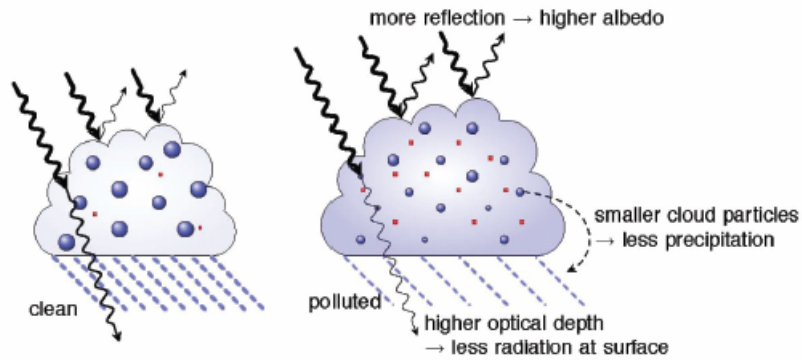
cloud albedo effect:

Erhöht sich die Aerosolkonzentration, so stehen dem Wasserdampf mehr Kondensationskerne zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass sich bei gleicher Wassermenge mehr Wassertröpfchen mit kleinerem Radius ausbilden. Dadurch steigt das Reflexionsvermögen der Wolke und es wird weniger Sonnenlicht transmittiert. Die Albedo wird also größer (kühlender Effekt nimmt zu).

Zugleich nimmt wegen der kleineren und damit leichteren Wassertröpfchen die Niederschlagswahrscheinlichkeit ab, was eine längere Lebensdauer der Wolke zur Folge hat. Dies bezeichnet man als *lifetime effect*.

Es lässt sich leicht erkennen, dass die beiden Effekte gekoppelt sind, denn eine höhere Lebensdauer einer Wolke bewirkt auch, dass die Bewölkung und damit die gesamte Albedo zunimmt.

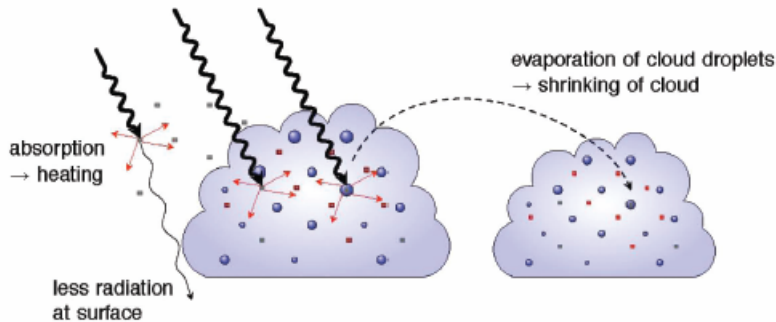
Cloud albedo and lifetime effect (negative radiative effect for warm clouds at TOA; less precipitation and less solar radiation at the surface)



semi – direct effect:

Bei diesem Effekt geht man davon aus, dass Rußpartikel in Wolken die Sonnenstrahlung adsorbieren und sich dadurch erwärmen. Es wird folgedessen weniger Sonnenlicht transmittiert. Messungen haben ergeben, dass Rußpartikel innerhalb von Wolken zu einer geschlossenen Wolkendecke führen, während Rußpartikel auf der Wolkenseite oder überhalb der Wolken die Wolkendecke in kleine Fragmente zerstückeln. Daraus ergibt sich, dass sich Rußpartikel in Wolken positiv auf den Strahlungshaushalt auswirken (Erwärmung) und Rußpartikel auf der Wolkenseite oder darüber negativ (Abkühlung). Weiterhin kann starkes Erhitzen der Wolke zu Verdampfen von Wasser führen, was die Wolke kleiner werden lässt.

Semi-direct effect (positive radiative effect at TOA for soot inside clouds, negative for soot above clouds)



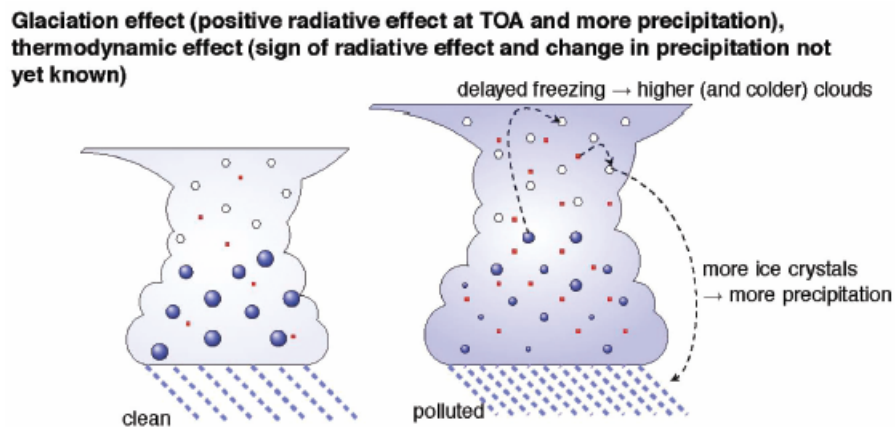
glaciation effect:

Bei diesem „Vereisungseffekt“ ist der Ausgangspunkt eine Erhöhung der Gefrierkerne. Dies hat zur Folge, dass unterkühlte Wassertröpfchen schnell gefrieren können.

Dabei ist die Umgebung der werdenden Eiskristalle im Bezug auf Eis übersättigt: Es fällt Niederschlag.

Der glaciation effect wirkt sich positiv auf den Strahlungshaushalt aus, da durch ihn kältere Wolken entstehen.

Dem gegenüber steht der *thermodynamic effect*, der von einer Verzögerung des Gefrierens ausgeht, was an einer größeren Anzahl an unterkühlten Wassertröpfchen sichtbar wird.



Diese Effekte wurden in einen Großteil der gebräuchlichen Klimamodelle eingebaut und ihre Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt der Erde berechnet.

Die Ergebnisse weichen von Klimamodell zu Klimamodell stark ab. Dennoch lässt sich global gesehen ein mittlerer Einfluss der Effekte von ca. $-0,2\text{W/m}^2$ bis $-2,3\text{W/m}^2$, im Gesamtdurchschnitt etwa $-1,2\text{W/m}^2$, annehmen.

Dieser Wert scheint gegenüber der Strahlungsleistung der Sonne auf die Erde relativ gering (nur 0,5%). Allerdings sind die Werte die bezüglich der Klimaerwärmung gemessen wurden in der gleichen Größenordnung, womit sich ergibt, dass die obigen Effekte in ihrer Bedeutung für die Klimaänderung nicht zu vernachlässigen sind.

4. Literaturverzeichnis

Internet:

- 1) www.wolkenatlas.de
- 2) <http://earthobservatory.nasa.gov/>

Bücher:

- 3) Meteorologie, Hans Häckel, 6. Auflage Ulmer Verlag
- 4) Klimatologie, Christian-Dietrich Schönwiese, 3. Auflage Ulmer Verlag
- 5) Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre, Kose, Springer- Verlag
- 6) Meteorologisches Grundwissen, Zmarsky/Kuttler/Pethe, 3. Auflage Ulmer Verlag
- 7) Climate Change 2007 – The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel of Climate Change, Cambridge University Press

Texte von Prof. Gebhardt:

- 8) Small scale cloud processes and climate, Marcia Baker and Thomas Peter, nature publishing group 2008
- 8) Impact on deforestation in the Amazon basin on the cloud climatology, pnas vol. 106 no. 10
- 10) Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system, Bjorn Stevens and Graham Feingold, nature publishing group 2009