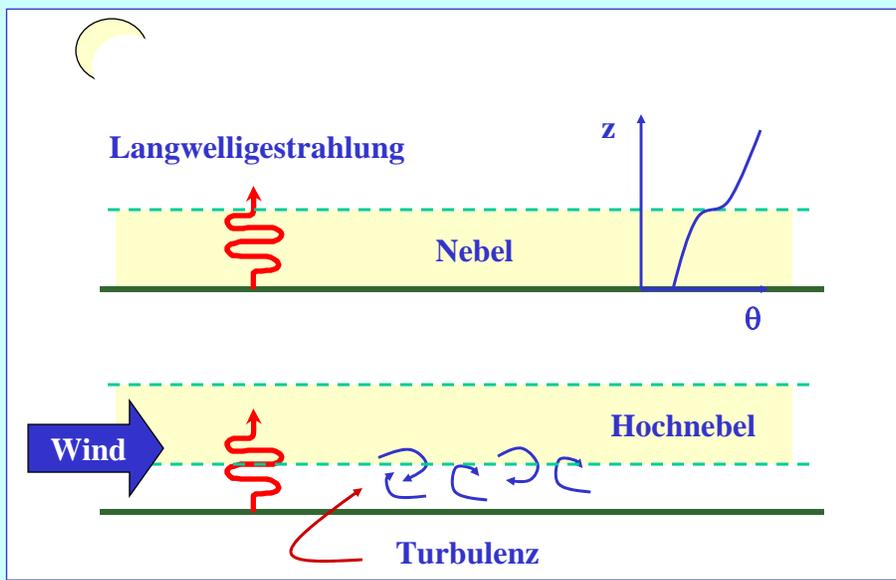


Wolkenbildung durch diabatische Abkühlung

- Wenn die bodennahe Luft in Berührung mit einer kalten Oberfläche kommt, kühlt sie sich unter Umständen soweit ab, daß die Temperatur bis zum Taupunkt sinkt.
- Die besten Beispiele dafür sind
 - die Nebelbildung in wolkenlosen, windschwachen Nächten auf Grund der Strahlungsabkühlung der Erdoberfläche - (Strahlungsnebel), und
 - die Bildung von **Advektionsnebel**, wenn warme Luft über kalten Untergrund (kalte Wasserfläche oder kaltes winterliches Festland) strömt.

Strahlungsnebel



- Durch die Bodenturbulenz kann die Abkühlung eine mehrere hundert Meter mächtige Schicht erfassen.
- Der Nebel liegt dann nicht am Boden auf, sondern erscheint als gleichförmig graue Schicht von tiefliegenden Stratuswolken, die oft nicht dicker als 300 m ist.
- Neben der Bodenabkühlung führt auch die Abkühlung durch Wärmeabstrahlung von Dunstschichten zur Wolkenbildung.
- Solche Dunstschichten, die sich häufig unterhalb einer Inversion befinden und aus Aerosolkernen und Wasserdampf bestehen, strahlen Wärme in die höheren, kälteren Schichten und in den Weltraum ab.
- Besonders nachts kühlen sie sich dadurch von oben her ab. Wenn der Taupunkt erreicht wird, bilden sich unter der Inversion ausgedehnte Wolkenfelder (**Stratocumulus-** oder **Alto cumuluswolken**).

Advektionsnebel



Wolkenbildung durch Wasserdampfungnahme

- Wenn sehr kalte Luft über warmes Wasser fließt, so daß ein sehr starkes Taupunktgefälle zwischen der Wasseroberfläche und der Luft herrscht, verdunstet warmes Wasser in die kalte Luft.
- Dadurch kommt es unmittelbar über der Wasseroberfläche zur Übersättigung und zur Bildung von Nebeltröpfchen.
- Diese werden in der von unten erwärmten labilen Kaltluft aufwärts transportiert und verdunsten in der trockenen Umgebungsluft.
- Es entsteht der Eindruck einer rauchenden Wasseroberfläche (**Seerauch**).

- Im Binnenland kann man diese Nebelart über Bächen, Seen und feuchten Äckern bei einem **Kälteeinbruch** beobachten.
- Auf ähnliche Weise bilden sich Verdunstungswolken, wenn warmer Niederschlag aus höheren Schichten in kältere darunter fällt und verdunstet.
- Solche Verhältnisse findet man unter aufgleitender Warmluft, insbesondere im Winter in einer bodennahen Kaltluftschicht.

Kondensstreifen



- Die plötzliche Zunahme von Wasserdampf ist die Ursache für die Entstehung von **Kondensstreifen**.
- Die Flugzeuge stoßen heiße und mit Wasserdampf angereicherte Abgase in die kalte Umgebungsluft aus.
- Durch die starke Abkühlung ist der Wasserdampf schnell übersättigt und kondensiert bzw. sublimiert schlagartig.
- Beständig sind die Kondensstreifen bei Temperaturen unter 40°C, d.h. in Flughöhen über 8 km bis 10 km, vorausgesetzt die Luft ist relativ feucht.

Wolkenbildung durch adiabatische Abkühlung bei starkem Druckfall

- In **Tornados** und **Wasserhosen** herrscht auf engstem Raum ein sehr niedriger Druck.
- Die von außen einströmende Luft dehnt sich deshalb adiabatisch aus und kühlt sich ab, was zur Bildung von trichterförmigen Wolken (**Rüssel**) führt.



Wasserhosen



Eine Wasserhose

Die Wolkenklassifikation

- Die heute verwendete Wolkenklassifikation, die 1803 von dem englischen Meteorologen **Luke Howard** (1772-1864) aufgestellt wurde, unterscheidet die Wolken nach ihren charakteristischen Erscheinungsformen und nach ihrer Höhenlage.
- Howard teilte die Wolken in vier Hauptklassen ein und gab ihnen lateinische Namen:
 - **Cumulus** (lat. = Haufen) für Konvektionswolken,
 - **Stratus** (lat. = ausgebreitet) für Schichtwolken,
 - **Cirrus** (lat. = Haarlocke, Federbusch) für faserige Wolken
 - **Nimbus** (lat. = Regen) für Regenwolken.

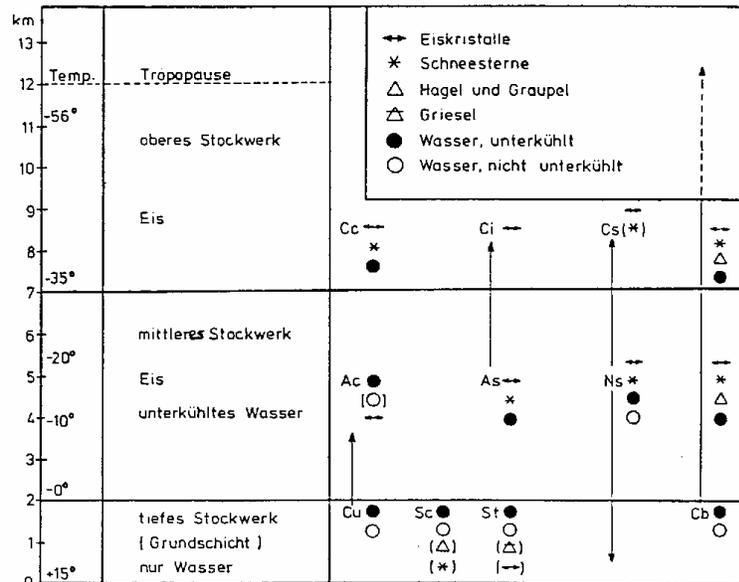
- Durch Kombination der Begriffe (z. B. Cirrostratus, Stratocumulus) werden die Hauptklassen weiter unterteilt.
- In der international gültigen Wolkenklassifikation verwendet man heute die Bezeichnung "**Nimbo-**" oder "**-nimbus**" nur als Zusatz für Wolken mit Niederschlag (z. B. **Nimbostratus, Cumulonimbus**).
- Mittelhohe Wolken erhalten die Vorsilbe "**Alto-**" (lat. altus = hoch, tief; z. B. **Altostratus, Altocumulus**).

Wolkenstockwerke

- Es wird drei verschiedenen Höhenbereichen definiert, in denen die hohen, mittelhohen und tiefen Wolken vorkommen (**Wolkenstockwerke**).
- Die Wolkenklassifikation umfaßt in den Wolkenstockwerke , insgesamt zehn Hauptwolkentypen (**Wolkengattungen**):
 - Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc), Cirrostratus (Cs) (hohe Wolken zwischen 5 km und 13 km),
 - Altocumulus (Ac), Altostratus (As), Nimbostratus (Ns) (mittelhohe Wolken zwischen 2 km und 7 km),
 - Stratocumulus (Sc), Stratus (St), Cumulus (Cu), Cumulonimbus (Cb) (tiefe Wolken zwischen 0 km und 2 km). **Wolkenstockwerke**

- Die Höhenangaben gelten für mittlere Breiten; je nach Jahreszeit und Luftmasse können sich Abweichungen ergeben.
- Wolken mit großer Vertikalbewegung erstrecken sich über mehrere Wolkenstockwerke.
- Die Cumuli reichen beispielsweise oft bis ins mittelhohe Niveau und die Cumulonimbuswolken bis ins obere Stockwerk (häufig bis zur Tropopause).
- **Das nächste Bild** zeigt eine schematische Darstellung der Wolkenstockwerke mit den jeweiligen Wolkengattungen und den Wolkenbestandteilen.





Temperatur- und Höhenbereiche der Wolkengattungen sowie Art der Wolkenbestandteile.

- Zur genaueren Kennzeichnung werden die Wolkengattungen nach mehreren Arten und Unterarten weiter unterschieden (s. Tab. 8.1 im Skript.).
- Die **Wolkenart** bezeichnet im allgemeinen die äußere Form oder die Mächtigkeit bestimmter Gattungen näher (z. B. **lenticularis** = linsenförmig, **castellanus** = türmchenförmig).
- Die **Wolkenunterart** kennzeichnet die Form noch näher (z. B. **undulatus** = wellenförmig) oder gibt spezielle Eigenschaften an (z. B. **translucidus** = durchscheinend).
- Außerdem können noch bestimmte Sonderformen und Begleitwolken (z. B. **incus** = mit Amboß, **mamma** = mit beutelförmigen Auswüchsen an der Wolkenunterseite) gekennzeichnet werden.



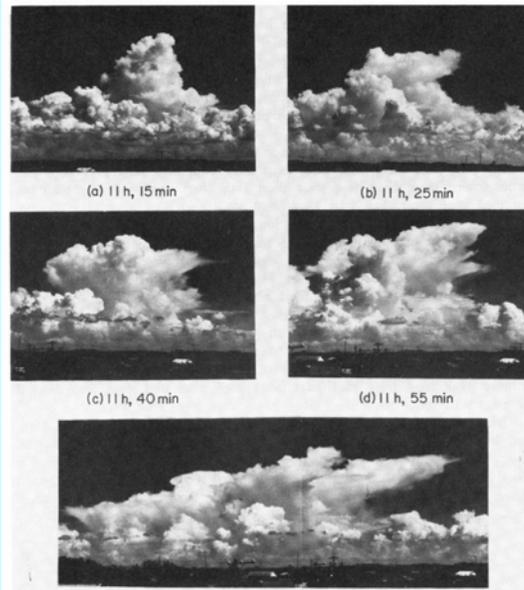
Mammatus unter einem Amboß

Literatur

- Eine ausführliche Beschreibung der Wolkenklassifikation findet sich im "**Internationalen Wolkenatlas**" (herausgegeben von der Weltorganisation für Meteorologie, WMO), der auch charakteristische Wolkenbilder enthält.
- Empfehlenswert ist das Buch "**Clouds of the World**" von **R. S. Scorer** (mit Wolkenbildern und physikalischen Erläuterungen) und in den "**Wolkenatlas**" von **de Bont**.

Konvektionswolken

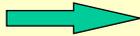
- **Das nächste Bild** zeigt verschiedene Entwicklungsstadien von Konvektionswolken.



Der Übergang eines Cumulus congestus zu einem Cumulonimbus während 55 Min.

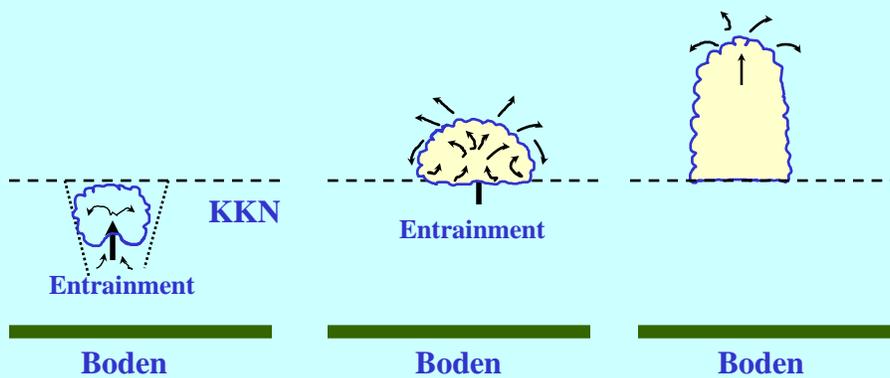
- Die Höhen von weniger mächtigen Konvektionswolken werden vielfach durch stabile Schichten (Inversionen) in der unteren Troposphäre begrenzt.
- Wenn sich diese Wolken unterhalb der Inversion horizontal ausbreiten, entstehen Stratocumuluswolken.



- Sowohl die Eisschirme von Cumulonimben als auch die Stratocumuluswolken können die Aufheizung der Erdoberfläche stark abschwächen und deshalb die Bildung von neuen Konvektionswolken behindern.
- Wenn man Konvektionswolken genauer beobachtet, zeigt sich, daß sie aus mehreren einzelnen Haufen oder Türmen zusammengesetzt sind, deren Wachstum und Auflösung innerhalb von Minuten abläuft.
- Zahlreiche dieser Wolkentürme sind in **der nächsten Bild** zu sehen. 
- Sie werden alle durch aufsteigende Warmluftblasen (**Thermikelemente**) gebildet.
- Die Auftriebskraft der Luft in solchen Thermikelementen nützen Segelflugpiloten und Vögel zum Höhengewinn.



**Der Übergang vom unsichtbaren Thermikelement
zum Wolkenturm**



**Eine Cumuluswolke besteht aus zahlreichen Thermikelementen
in den verschiedenen Entwicklungsstadien.**

Abwinde

- Die Verdunstung an den Rändern der Wolken führt in der Umgebungsluft zu Abkühlung und Absinken.
- Thermikelemente können wegen der Abwinde über dem KKN **nur innerhalb der Wolken aufsteigen**. Cumuluswolken haben deshalb scharfe Umrisse.
- Absinkende Luftbewegungen beobachtet man **nicht nur** an den Wolkenrändern sondern im gesamten Bereich zwischen den Konvektionswolken.
- Durch dieses großflächige langsame Absinken wird die relativ starke (im Mittel) aufwärts gerichtete Bewegung der Luft in den Cumuluswolken kompensiert.

Einfluß älterer Thermikelemente

- Die Erwärmung und Abtrocknung , die mit dem Absinken verbunden sind, unterdrückt das Aufsteigen von Thermikelementen im Gebiet zwischen den Wolken.
- Daher nehmen neue Thermikelemente häufig den gleichen Weg wie ihre Vorgänger und geben bereits bestehenden Wolken neue Nahrung.
- Da von jedem aufsteigendem Thermikelement etwas Feuchte zurückbleibt, wird die Verdunstung in den neuen Thermikelementen vermindert, d.h. deren Auftriebskraft schwächt sich langsamer ab.

Modell eines Thermikelements

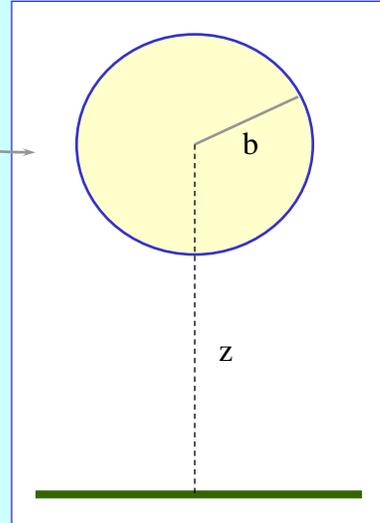
Ein Thermikelement idealisiert als eine kugelförmige Luftblase mit Radius b

Angenommen $b = \alpha z$

eine Konstante

Die **Entrainmentrate** E , ist als relativer Massenzuwachs pro Zeiteinheit definiert

➔
$$E = \frac{1}{m} \frac{dm}{dt}$$



Die Entrainmentrate ist

$\rho =$ (konstanter) Luftdichte

$$E = \frac{1}{m} \frac{dm}{dt} = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi b^3 \rho} \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3}\pi b^3 \rho \right) = \frac{3}{b} \frac{db}{dt}$$

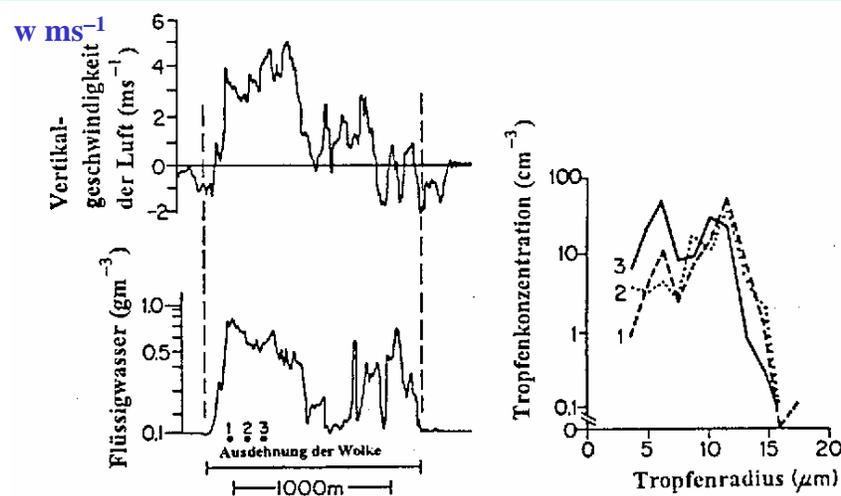
➔
$$E = \frac{3}{b} \frac{db}{dt} = \frac{3\alpha}{b} \frac{dz}{dt} = \frac{3\alpha w}{b}$$

$w =$ Vertikalgeschwindigkeit des Thermikelements

E ist direkt proportional zu w und umgekehrt proportional zu b .

Die Mikrostruktur von Konvektionswolken

- Die Mikrostruktur von Konvektionswolken kann mittels Flugzeugmessungen untersucht werden.
- Das nächste Bild zeigt die gemessene Aufwindgeschwindigkeit, die beim Flug durch eine Cumuluswolke gemacht wurde.
- Es zeigt auch den Flüssigwassergehalt und die Tropfenspektren.
- Die Cumuluswolke hatte eine relativ geringe vertikale Mächtigkeit von 2 km und aus der Wolke fiel kein Niederschlag.



- Innerhalb der Wolke ist die Luftbewegung fast überall nach oben gerichtet.
- Die Luft sinkt in der Umgebung der Wolke ab.

Aufwindgeschwindigkeiten, Flüssigwassergehalt und Tropfenkonzentration in größeren Konvektionswolken

- In größeren Konvektionswolken (z. B. Cumulus congestus oder Cumulonimbus) werden Aufwindgeschwindigkeiten von 30 ms^{-1} gemessen.
- Der Flüssigwassergehalt erreicht dann einige gm^{-3} (Werte von 20 gm^{-3} wurden in Hagelwolken festgestellt) bei einer Tropfenkonzentration von einigen hundert pro cm.

Mammatus Wolken

- Unter bestimmten Voraussetzungen können sich Wolken auch von oben nach unten entwickeln.
- So bilden sich an der Unterseite von Amboßwolken oft hängende, beutelförmige Quellformen (Cumulonimbus **mamma**).
- Auf diese Weise werden die **Abwinde** sichtbar, die entstehen, wenn fallende Niederschlagsteilchen Luft aus der Wolke mitreißen.
- **Eine weitere Ursache** für die Abwinde ist die Verdunstung der Niederschlagsteilchen unterhalb der Wolkenbasis, wodurch die Luft dort kälter und schwerer wird.

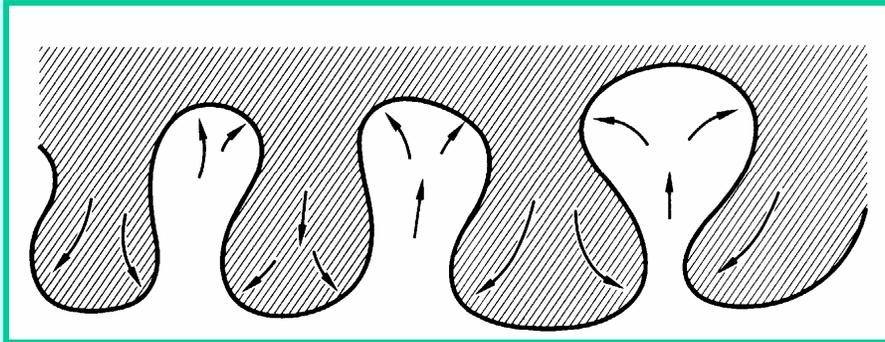


Mammatus unter einem Amboß



Mammatus unter einem Amboß

Mamma



Die zweite Ursache für die Entstehung von Mamma

