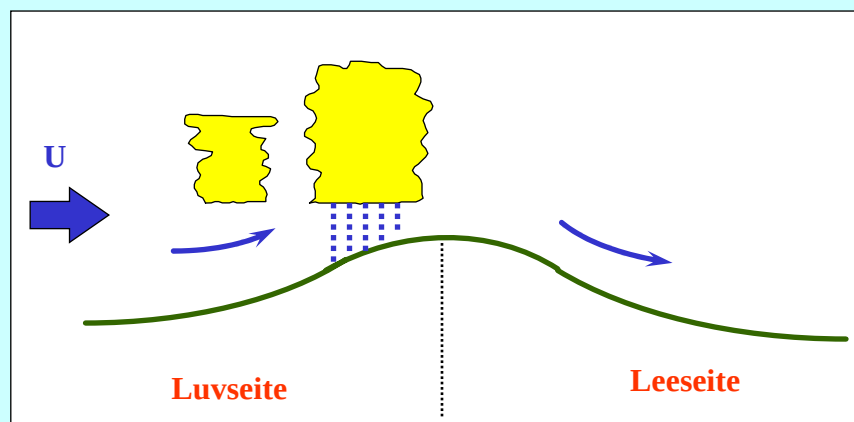
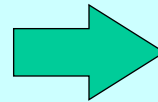


Orographische Wolken

- Orographische Wolken entwickeln sich je nach Luftschichtung in verschiedenen Formen und Höhen, wenn die Luft über ein Hindernis (Hügel, Bergkette) strömt.
- Wenn die Schichtung feuchtlabil oder beinahe feuchtlabil ist, wird die Luft durch die Hebung weiter labilisiert.



Auf der **Luvseite** bilden sich dann Wolken vom Cumulus- oder Cumulonimbustyp, mit oder ohne Niederschlag.

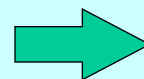
Auf der **Leeseite** erfolgt in der absinkenden Luft Wolkenauflösung.

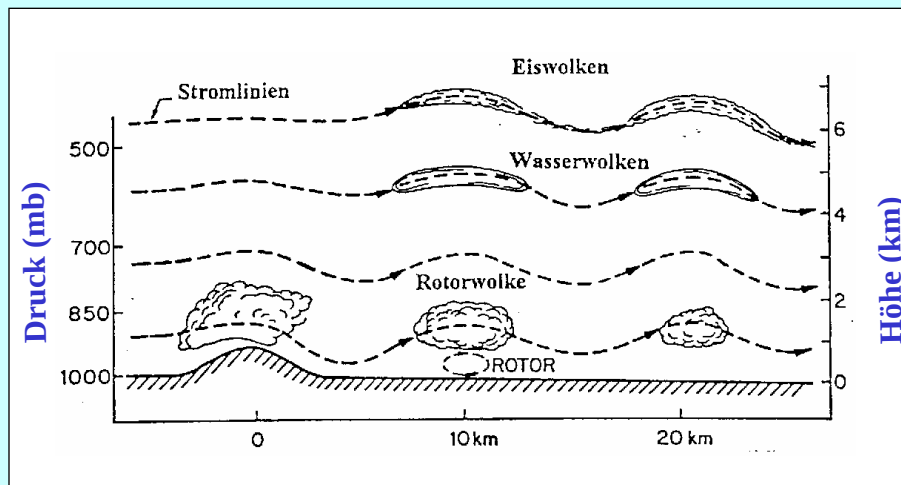
Auswirkungen auf die Bewölkungs- und Niederschlagsverhältnisse

- Das Aufsteigen bzw. Absinken der Luft an Hindernissen hat wichtige Auswirkungen auf die Bewölkungs- und Niederschlagsverhältnisse.
- Besonders deutlich wird dies dort, wo feuchte Meeresluft über küstennahe Gebirge strömt (z. B. **Kaskadengebirge und Sierra Nevada im Westteil der USA, neuseeländische Alpen**).
- Während sich auf der Luvseite verstärkt Wolken bilden und hohe Niederschlagsmengen auftreten, lösen sich im Lee die Wolken in der absinkenden Luft auf und es fällt zum Teil so wenig Niederschlag, daß Trockengebiete entstanden sind (z. B. **Steppe und Wüste im Lee der Sierra Nevada**).

Leewellen

- **Bei stabiler Schichtung** verursacht die Überströmung eines Hindernisses eine gleichmäßige Hebung der Luft in einer sehr mächtigen Schicht, die sogar Teile der Stratosphäre erfassen kann.
- Auf der Leeseite entstehen interne **stehende Wellen**.
- Man bezeichnet sie als **Schwerewellen** da bei diesen Wellen die Schwerkraft als rücktreibende Kraft wirkt.
- Wenn die Luft in den Wellen über das Hebungs-kondensationsniveau gehoben wird, kommt es zur Wolkenbildung.





Leewellenwolken

- In der Troposphäre liegt die Wellenlänge der Leewellen im allgemeinen zwischen 5 km und 25 km.
- Manchmal werden mehr als sechs aufeinanderfolgende Wellen beobachtet.
- Die **Leewellenwolken** sind stationär und wandern nicht, obwohl sie von der Luft mit der Geschwindigkeit des Höhenwindes durchströmt werden.
- Die Wolke setzt sich ständig aus neuen Wolkentropfen zusammen, die sich beim Eintritt in die Wolke im aufwärts gerichteten Ast der Leewelle immer wieder neu bilden und beim Austritt aus der Wolke im absteigenden Teil der Welle verdunsten.

- Leewellenwolken haben häufig ein linsenförmiges Aussehen und erhalten daher zum Wolkennamen den Zusatz **lenticularis** (z. B. *Altostratus lenticularis*).
- Untersuchungen der Leewellenbildung haben ergeben, daß die Vertikalprofile von Wind und Temperatur sowie die Form des überströmten Berges eine wichtige Rolle spielen.
- Die **Amplitude der Leewellen** ist um so größer, je mehr die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt und die vertikale Stabilität zwischen der unteren und der oberen Troposphäre abnimmt.
- Besonders geeignet für die Entstehung von Leewellen ist die mit einer Inversion verbundene stabile Schicht, die als **Wellenleiter** wirkt.



Leewellenwolken



Leewellenwolken



Leewellenwolken



Die 'Morning Glory' von nordost Australien

Luftmassengewitter

- Über den relativ warmen und feuchten Gebieten der Erde entstehen häufig aus Cumuluswolken Gewitter, die einen wichtigen Beitrag zur Gesamtregenmenge liefern.
- Zahlreiche Gewitter gibt es in den feuchten Regionen der Tropen und im Sommer über den Kontinenten in mittleren Breiten, wenn warme maritime Luftmassen herangeführt werden.
- Beispielsweise bilden sich in Bayern Gewitter im Sommer bevorzugt bei einer warmen und feuchten südlichen oder südwestlichen Luftströmung.
- Diese lokalen Sommergewitter nennt man **Luftmassengewitter**.

Wärmegewitter

- Wir möchten die Luftmassengewitter von den Gewittersystemen mit größerer Ausdehnung in Verbindung mit synoptischen Störungen (z. B. Kaltfronten) zu unterscheiden.
- Zu den Luftmassengewittern gehören **Wärmegewitter** und **orographische Gewitter**.
- **Wärmegewitter** entstehen durch Aufheizung einer feuchtwarmen Luftmasse von der Erdoberfläche her und sind überwiegend im Sommer am Nachmittag und Abend zu beobachten.

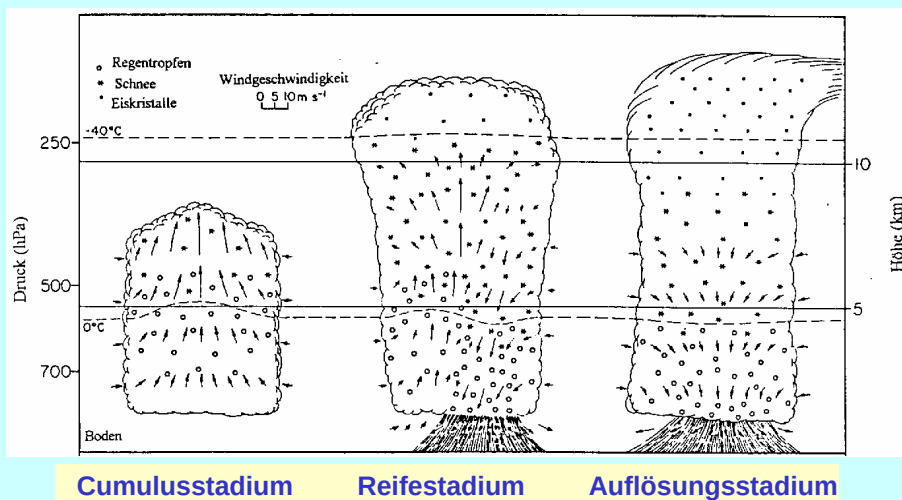
Orographische Gewitter

- Während bei Wärmegewittern die Wolkenbildung durch aufsteigende Thermikelemente ausgelöst wird, haben **orographische Gewitter** ihre Ursache in der erzwungenen Hebung bei Überströmung eines Hindernisses.
- Sie sind ortsgebunden, da nur am Gebirge das Hebungs-kondensationsniveau erreicht wird.
- Manchmal werden Wärmegewitter, die sich infolge der günstigen Einstrahlungsbedingungen an Gebirgshängen entwickeln, ebenfalls als orographische Gewitter bezeichnet.

Ergebnisse des Thunderstorm Projekts

- Die Erforschung der Luftmassengewitter war das Ziel einer großen Meßkampagne Ende der 40er Jahre.
- Für das sogenannte **Thunderstorm Project** wurden zahlreiche Messungen in Gewittern über Florida und Ohio durchgeführt.
- Das **nächstes Bild** zeigt das idealisierte Modell einer Gewitterzelle.
- Die meisten Luftmassengewitter bestehen aus mehreren solchen Zellen, die sich der Reihe nach aufbauen und auflösen mit einer Lebensdauer von ungefähr einer halben Stunde.
- Im Lebenszyklus einer Gewitterzelle unterscheidet man drei Entwicklungsstadien.

Entwicklungsstadien einer Gewitterzelle in einem Luftmassengewitter



Der horizontale Maßstab ist im Verhältnis zum vertikalen Maßstab um 30% gestaucht.

- Aus den Daten, die durch das Thunderstorm Project gewonnenen wurden, ergibt sich, daß nur ca. 20% des Wasserdampfs, der in der aufsteigenden Wolkenluft kondensierte, die Erdoberfläche in Form von Niederschlag erreicht.
- Der übrige Teil verdunstet in der Abwindzone oder bleibt in den Wolkenresten zurück, deren Wasserdampf in die Umgebungsluft verdunstet.
- Zu den Resten einer Gewitterwolke gehören auch große Felder von durch Ausbreitung der **Amboßwolke** entstandenen Cirren.

Lebensdauer eines Luftmassengewitters

- Die Gewitterzellen in Luftmassengewittern sind kurzlebig.
- Es entstehen selten starke Winde oder Hagel, weil in den Zellen ein **Selbstzerstörungsmechanismus** abläuft.
- Dieser Mechanismus beginnt mit der Bildung der Abwindzone bei einsetzendem Niederschlag, denn ohne vertikale Windscherung ist damit die Zerstörung der Aufwinde verbunden, die für das Wachstum der Niederschlagsteilchen verantwortlich sind.
- Es gibt für die Wolke keine Möglichkeit, den Niederschlag loszuwerden, ohne sich dabei selbst zu zerstören.

Elektrisierungsprozesse in Gewitterwolken

- Die Elektrisierungsprozesse in Gewitterwolken sowie Blitz und Donner werden im Rahmen dieser Vorlesung nicht behandelt.
 - Wallace und Hobbs Kapitel 4.6, S. 202ff
 - DWD-Leitfaden Nr. 1 "Allgemeine Meteorologie", S. 112ff).

Frontgewitter

- Frontgewitter entstehen, wenn die Warmluft die an einer Front aufgleitet, feuchtlabil oder latent labil geschichtet ist.
- Ihre Auslösung erfolgt also nicht wie bei Luftmassengewittern durch Labilisierung auf Grund starker Erwärmung der Luft vom Boden her.
- Frontgewitter sind deshalb an keine Tages- oder Jahreszeit gebunden, jedoch wird ihre Intensität von diesen beeinflusst.
- Typisch für alle Frontgewitter ist ihre wesentlich größere Ausdehnung im Vergleich zu den Wärmegewittern:
 - Senkrecht zur Front sind 10 km bis 20 km und entlang der Front Ausdehnungen bis zu mehreren 100 km beobachtet worden.

- Grundsätzlich können sich Frontgewitter an jeder Frontart bilden.
- Es gibt aber wesentlich mehr Kaltfrontgewitter als Warmfrontgewitter, weil der Entwicklung von Gewittern an Warmfronten normalerweise die stabile Schichtung (Aufgleiten von Warmluft über kälterer Luft) entgegensteht.
- **Warmfrontgewitter** können sich nur dann bilden, wenn die aufgleitende Warmluft schon vorher labil geschichtet war.
- Am bekanntesten sind Warmfrontgewitter in den USA, wo sie häufiger beim Vorstoß von sehr warmer und feuchter Luft aus dem **Golf von Mexiko** in den Südstaaten auftreten.
- In Mitteleuropa kommen sie am ehesten bei der Zufuhr von Mittelmeerwarmluft aus südöstlichen Richtungen vor.

- **Kaltfrontgewitter** sind im allgemeinen schwerer als Warmfrontgewitter, weil die vorgelagerte Warmluft durch die hinter der relativ steilen Frontfläche vorstoßende Kaltluft kräftig und rasch gehoben wird.
- Außerdem kann ein Voreilen von Kaltluft in der Höhe zu einer zusätzlichen Labilisierung der Warmluft führen.
- Für die Intensität eines Kaltfrontgewitters ist neben der Stärke der Hebung die Feuchte und der Grad der Aufheizung der vorgelagerten Warmluft entscheidend.
- Mit Kaltfrontgewittern ist ein deutlicher Temperaturrückgang verbunden.
- Dabei wird die advektive Abkühlung durch die Verdunstung des Niederschlags noch verstärkt.



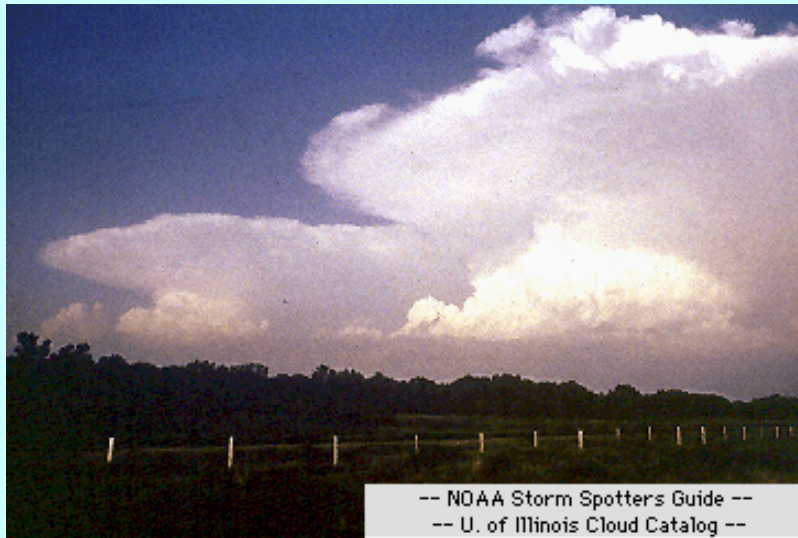
“Southerly buster” Frontgewitter in Australien

Konvektive Systeme

- Die Mehrzahl der schweren Gewitter, mit denen sintflutartige Regenfälle, große Hagelkörner, hohe Windgeschwindigkeiten und Tornados verbunden sind, bilden sich nur, **wenn die Luft feuchtilabil geschichtet ist und eine große vertikale Windscherung** zwischen der Strömung in Bodennähe und in der oberen Troposphäre besteht.
- In einer derartigen Umgebung können sich konvektive Niederschlagssysteme schnell entwickeln und lange im Reifestadium sein, ohne daß die Abwinde den Aufwindsektor zerstören.

- Schwere Gewitter setzen sich im allgemeinen aus mehreren Gewitterzellen zusammen, die im **mesoskaligen Bereich** organisiert sind.
- Der mesoskalige Bereich entspricht ungefähr 30-200 km.
- Häufig beobachtet werden **Squall lines, Multizellengewitter und Superzellengewitter**.
- Jeder dieser Gewittertypen kann mit Hilfe eines **idealisierten Modells** beschrieben werden, wodurch man die Vorgänge bei der Entstehung von Unwettern zumindest prinzipiell verstehen kann.

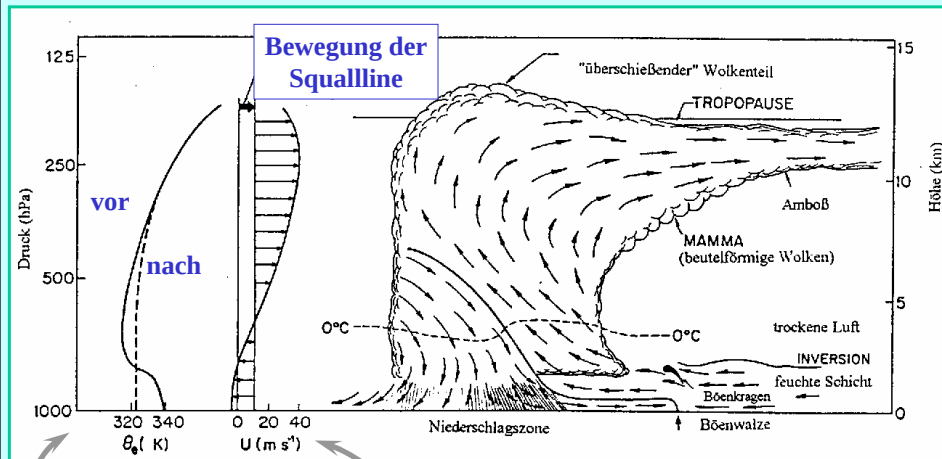




Squall lines

- Relativ häufig bilden sich linienförmige Aneinanderreichungen von Cumulonimben, so daß in erster Näherung das mesoskalige konvektive System als **Liniengewitter** betrachtet werden kann.
- Mit solchen Gewittern sind am Boden oft heftige Windböen verbunden; daher verwendet man die Bezeichnung **Böenlinie** (engl. **squall line**).
- Squall lines kommen während des Sommers häufig über dem **westlichen Afrika (südlich der Sahara)** und über bestimmten Landgebieten der mittleren Breiten vor (insbesondere im **zentralen und östlichen Teil der USA**).
- Auch in Mitteleuropa ordnen sich manchmal in der Warmluftmasse vor einer Kaltfront Gewitterzellen linienförmig parallel zur Front an.

Querschnitt durch eine Squall line



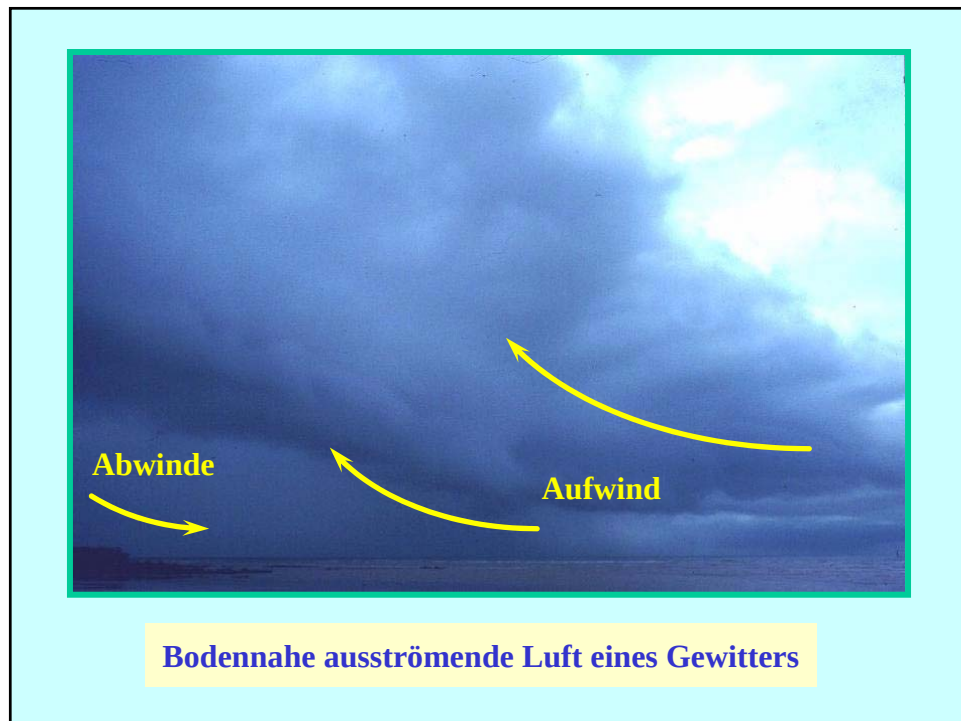
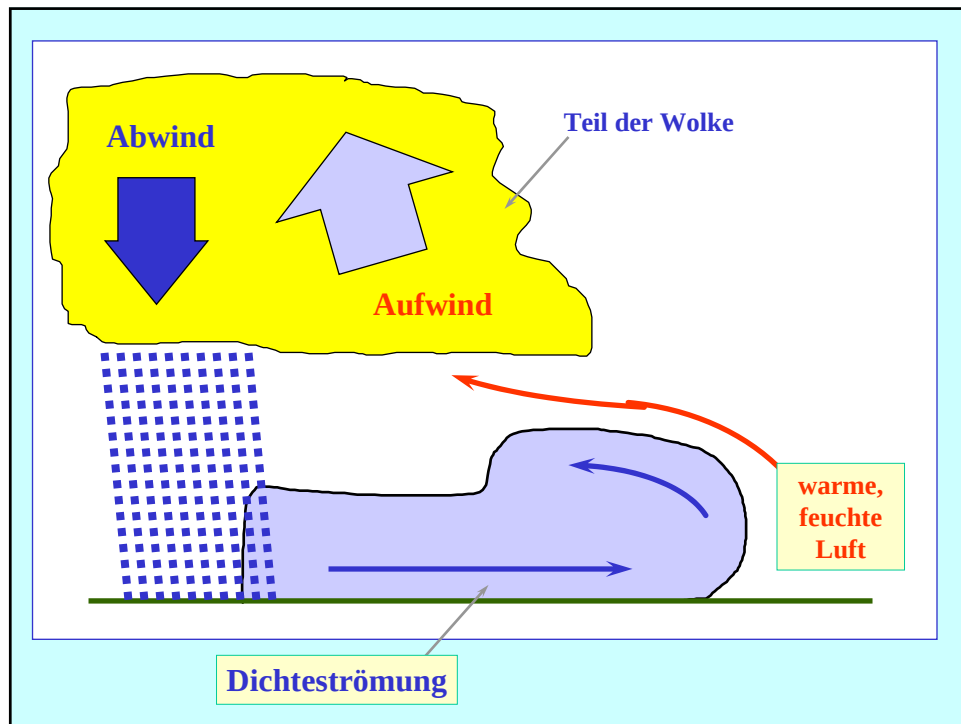
Vertikalprofil der θ_e in der Umgebungsluft

Wolkenumrisse und Luftbewegungen relativ zur Squall line.

Vertikalprofil der Windkomponente in Verlagerungsrichtung der Squall line

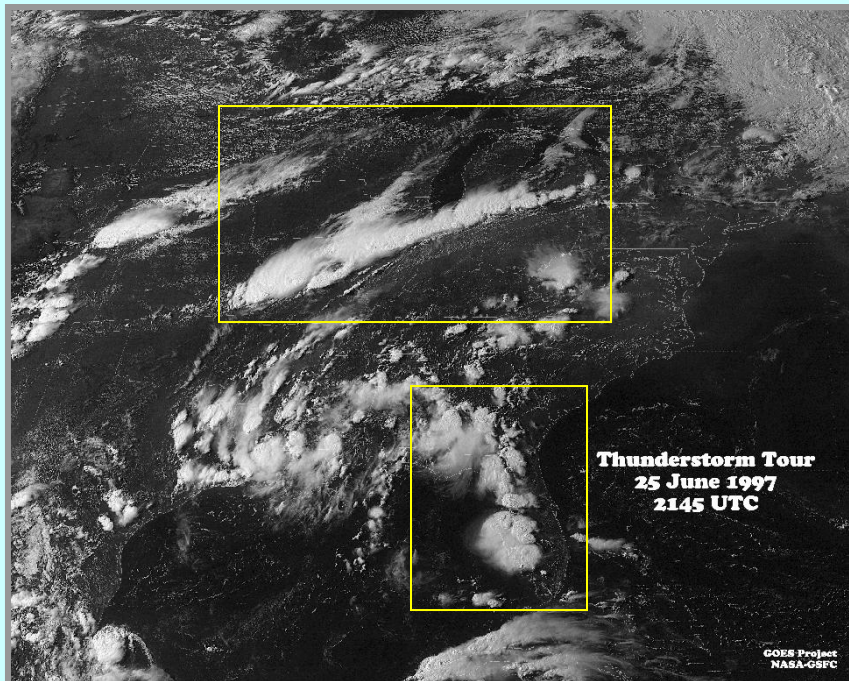


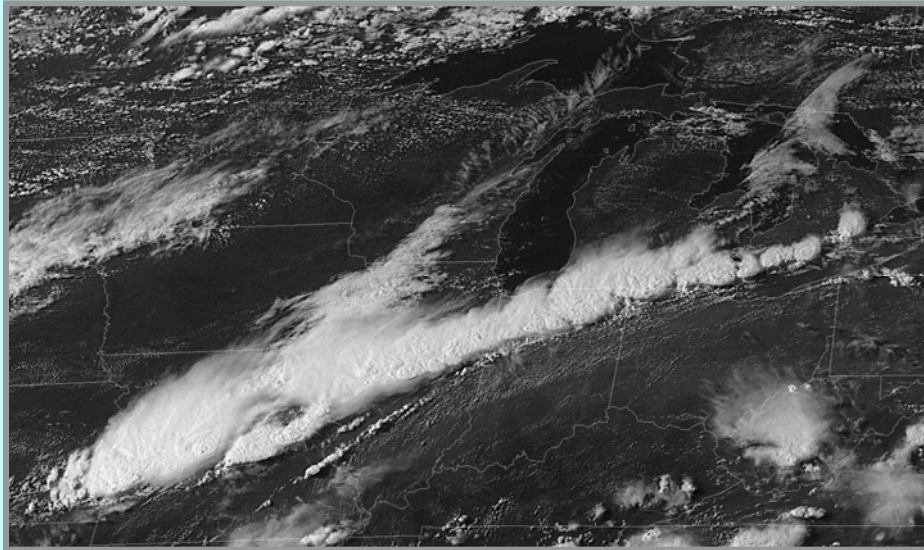
Squall line



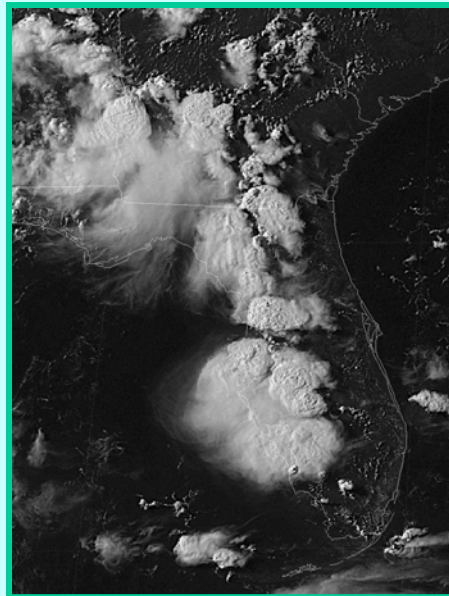


Arcus-Wolke - Oklahoma





Squall line über den USA



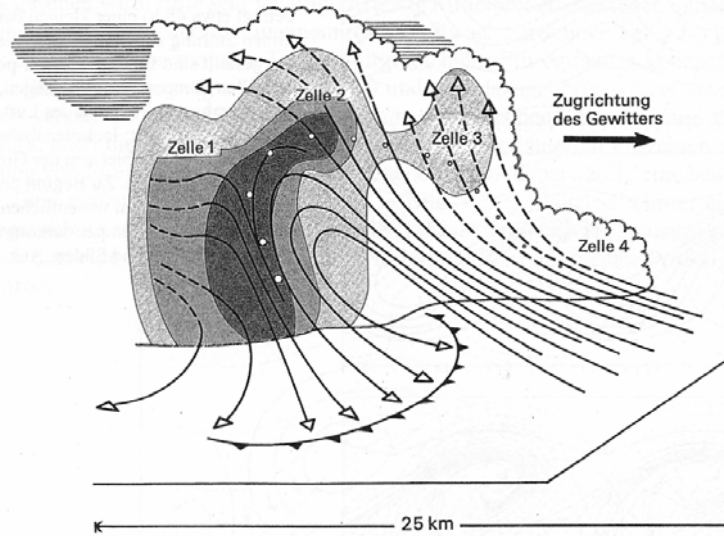
Gewitter über Florida

Multizellengewitter

- **Multizellengewitter** bestehen aus mehreren Gewitterzellen, die sich auf einer Seite des Systems immer wieder bilden und auf der anderen auflösen.
- In jeder der Zellen gibt es Aufwind- und Abwindgebiete wie in den Gewitterzellen eines Luftmassengewitters.
- Die Form, Größe und Intensität von Multizellengewittern kann sehr unterschiedlich sein.
- Für den hier beschriebenen Typ ist charakteristisch, daß sich das System nicht in Richtung der Luftströmung der mittleren Troposphäre bewegt, sondern davon nach rechts abweicht.

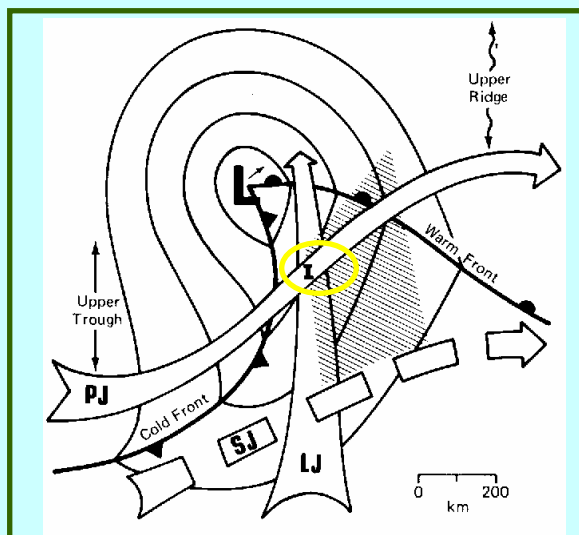
- Viele der schweren Gewitter, die sich im Sommer über dem zentralen Teil der USA bilden, gehören zu diesem Typ.
- Wenn man die Bewegung von Radarechos beobachtet, zeigt sich, daß sich die einzelnen Zellen der Multizellengewitter in Richtung des Windes in der mittleren Troposphäre bewegen.
- Das ganze Gewittersystem verlagert sich jedoch mehr nach rechts.
- Ursache dafür ist die Rechtsdrehung des Windes in der Umgebung des Multizellengewitters mit zunehmender Höhe.

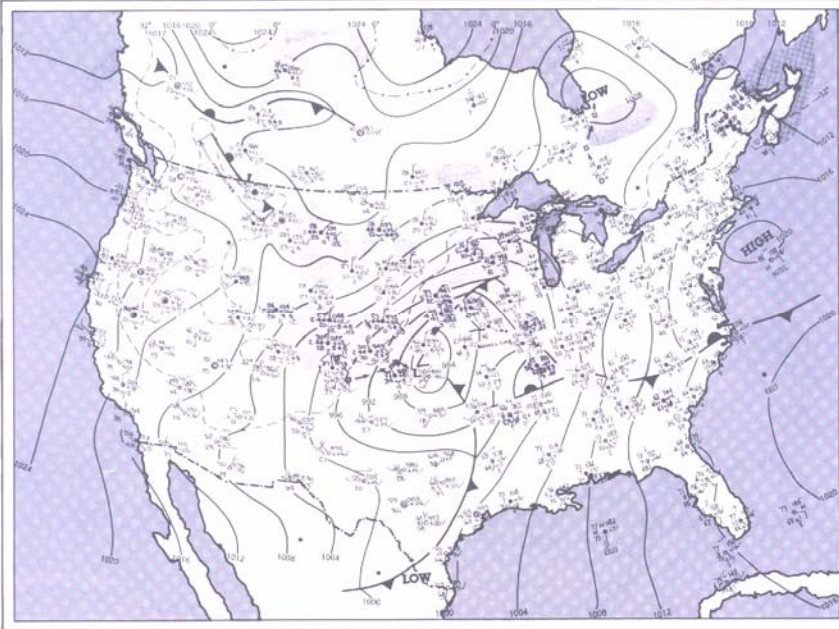
- Warmfronten, Kaltfronten und Okklusionsfronten als Strukturelemente einer Mittelbreiten-Zyklone mit $L_{\text{Zyklone}} \sim 1000 \text{ km}$ und $L_x \sim 100 \text{ km}$.



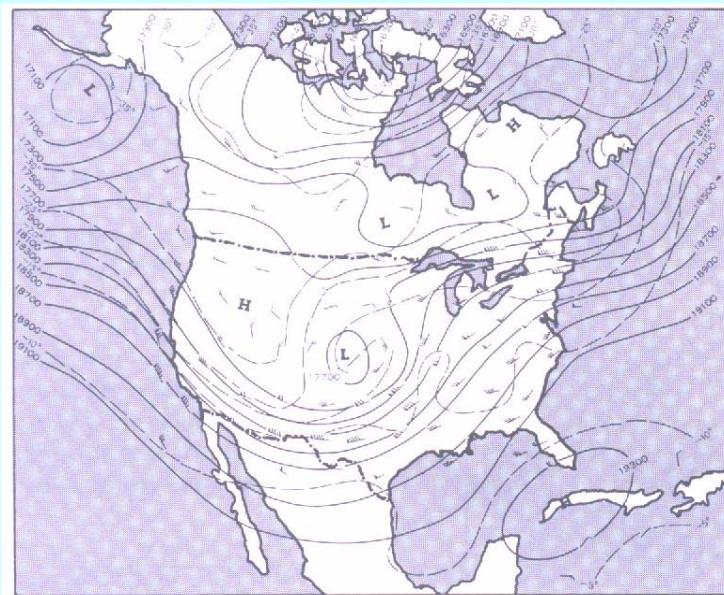
Multicell Gewitter

- Günstige synoptische Voraussetzungen für die Entwicklung von Multizellengewittern über den zentralen USA sind eine **bodennahe feuchte südliche Strömung vom Golf von Mexiko und darüber eine trockene südwestliche bis westliche Strömung.**
- Der Wind dreht mit der Höhe nach rechts (d.h. im Uhrzeigersinn).
- Aus diesem Grund strömt in Bodennähe die Luft in das Gewittersystem vorwiegend auf der rechten Seite ein (in Bewegungsrichtung des Systems gesehen).

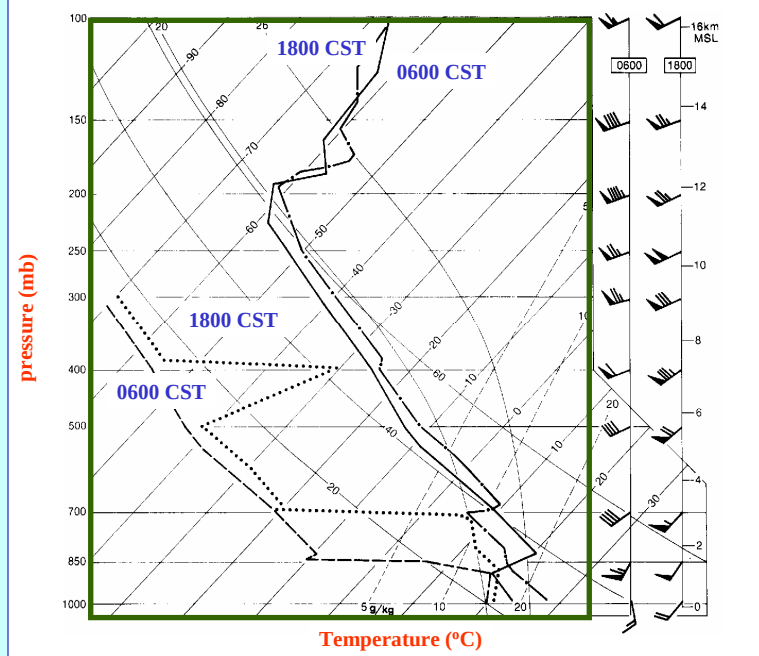




Bodenkarte am 03 April 1974 07 EST



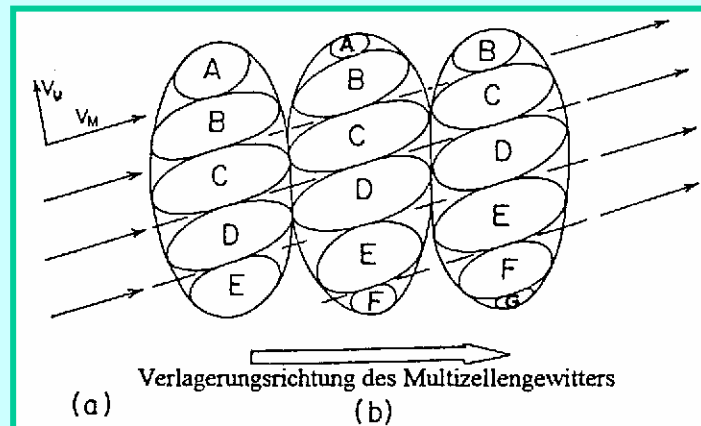
500 mb Isohypsen am 03 April 1974 07 EST



Jackson, Miss. am 03 April 1974

- Der schmale Streifen, wo die einströmende Luft über die kalte Abwindluft gehoben wird, ist ein geeigneter Ort für die Entwicklung neuer Zellen - dort entstehen immer wieder neue Zellen auf der rechten Seite des Gewitters.
- Damit wird der Abstand zwischen den alten Zellen und der Stelle, wo die bodennahe Luft einströmt, größer.
- Die ältesten Zellen auf der linken Seite des Gewitters bekommen immer weniger Nachschub an warmer, feuchter Luft, die zur Erhaltung der Auftriebskraft der Luft in der Aufwindzone notwendig ist.
- Sobald sich die Aufwinde in diesen Zellen abschwächen, lösen sich die Zellen langsam auf.

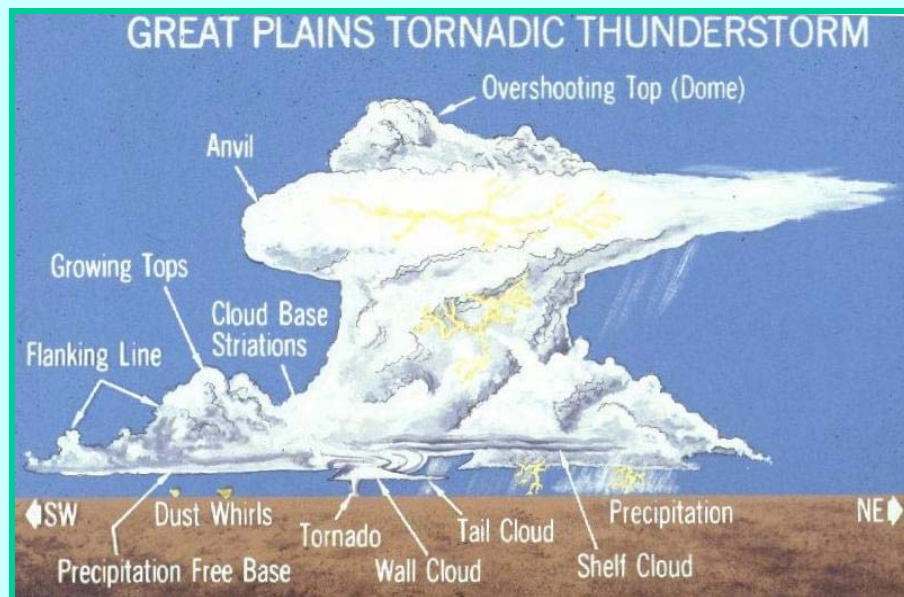
- Die Entwicklung neuer Zellen auf der rechten Seite des Gewittersystems bei gleichzeitiger Auflösung von alten Zellen auf der linken Seite hat zur Folge, daß die Bewegungsrichtung des Gesamtsystems von der Richtung des Höhenwindes nach rechts abweicht.
- **Das nächste Bild** zeigt schematisch diesen Vorgang.

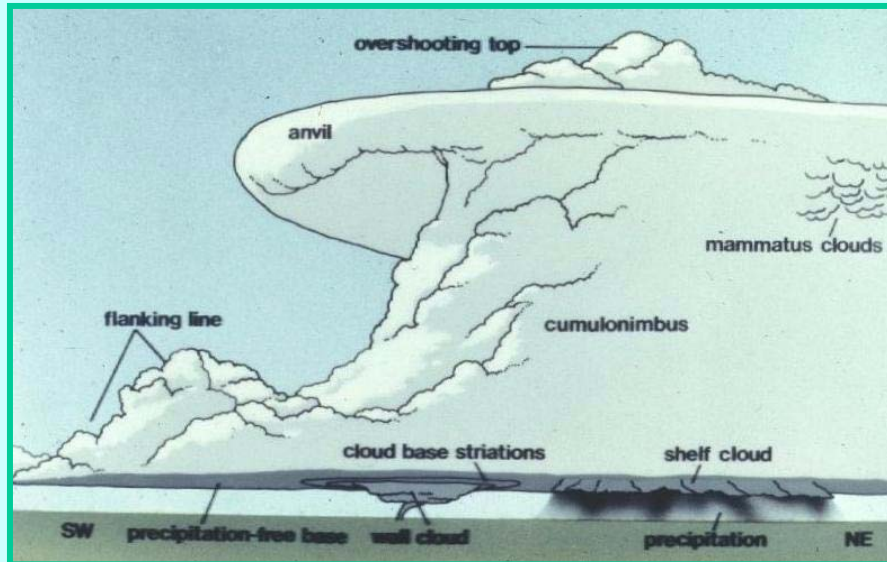


- Multizellengewitter mit nach rechts abweichender Verlagerungsrichtung.**
- (a) Windvektoren für die untere Troposphäre (v) und die mittlere Troposphäre (v).
 - (b) Lage der einzelnen Zellen in Abständen von ungefähr 15 min; die Zelle A löst sich auf, die Zellen F und G bilden sich neu.

Superzellengewitter

- Bei einem kleinen Bruchteil der schweren Gewitter sind die mesoskaligen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zellen so groß, daß sich das konvektive System wie **eine einzige riesige Zelle** verhält und nicht wie eine Gruppe von Zellen.
- Mit diesen sogenannten **Superzellengewittern** (engl. **supercell storms**) sind oft Tornados und/oder Hagelunwetter verbunden.
- Während der Verlagerung vieler Superzellengewitter beobachtet man eine Rechtsabweichung von der Richtung des Windes in der Umgebung (zumindest auf der Nordhalbkugel).





Supercell-Gewitter USA



- Im Gegensatz zu den Multizellengewittern verläuft diese Rechtsabweichung nicht in diskreten Sprüngen, wenn sich neue Zellen bilden und alte auflösen, sondern kontinuierlich.
- Zur Entwicklung von Superzellengewittern ist neben einer potentiell labilen Schichtung eine starke vertikale Windscherung bis in Höhen von 4-6 km erforderlich.
- Dann können am Rand der Aufwindzone Rotationsbewegungen entstehen, wodurch die aufsteigende Luft zusätzlich beschleunigt wird.
- Ein Beispiel für ein Superzellengewitter ist das **Münchner Hagelunwetter vom 12. Juli 1984.**

- Es bildete sich in feuchtwarmer und potentiell labil geschichteter Luft tropischen Ursprungs.
- Die Auslösung der Labilität wurde bis zum Nachmittag des 12.07. durch eine Inversion in 2 km Höhe verhindert.
- Erst die großräumige Hebung vor einem von Frankreich nordostwärts ziehenden Höhentrog bewirkte den Abbau der Inversion.
- Sehr schnell entstanden dann die ersten Gewitterzellen in der Nähe des Bodensees.
- Sie wanderten nordostwärts und intensivierten sich durch Einbeziehen der nördlich der Alpen lagernden feuchten Luft.

- Die am stärksten entwickelte Zelle zeigte das charakteristische Verhalten eines Superzellengewitters und produzierte an ihrem Südrand den 250 km langen und 5-15 km breiten Hagelstrich, der auch über München hinwegführte (weitere Einzelheiten s. Kurz, M., 1986).
- Die Entwicklung der Wetterlage des Münchner Hagelunwetters vom 12. Juli 1984. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 170).



Wall cloud



Tornado



Wasserhose



