

# Luftmassen und Fronten

## Luftmassen und Fronten

- Eine Gruppe von skandinavischen Meteorologen untersuchte Anfang der 20er Jahre das Verhalten von Tiefdruckgebieten in Europa.
- Die Ergebnisse dieser Forschung verwendet man immer noch im praktischen Wetterdienst.
- Damals wurden z.B. die Begriffe „**Luftmasse**“ und „**Front**“ eingeführt, um den Aufbau der Troposphäre in mittleren und hohen Breiten zu beschreiben.

## Luftmassen und Fronten 2

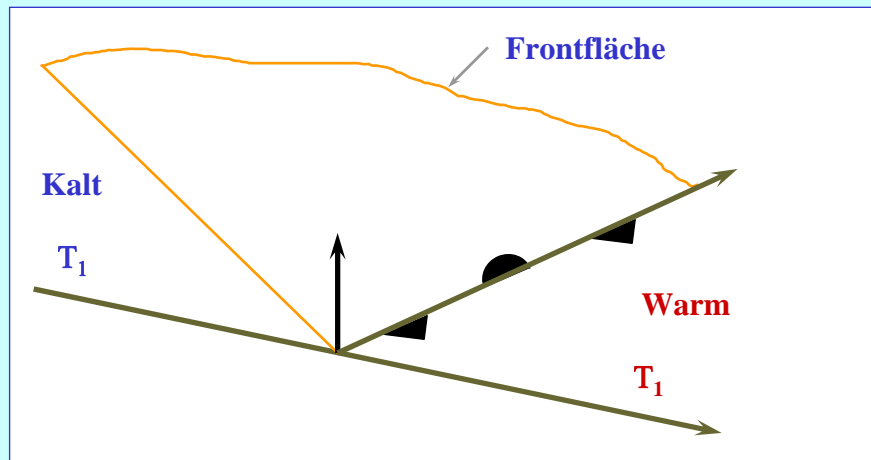
- Die täglichen Wetterbeobachtungen zeigen, daß die Temperatur vom Äquator zum Pol nicht gleichmäßig abnimmt.
- Es gibt große Gebiete mit nahezu einheitlichen Verhältnissen - sogenannte **Luftmassen**.
- Diese Luftmassen sind durch schmale Zonen getrennt, in denen sich auf geringe Entfernung die Temperatur stark ändert - sogenannte **Fronten**.
- Die Analyse der Fronten und Luftmassenverteilungen sowie ihre Darstellung in Karten bildet heute die Grundlage für eine Wettervorhersage.

## Luftmassen und Fronten 3

- Innerhalb einer Luftmasse ändern sich Temperatur, Feuchte, Stabilität und Staubkonzentration nur wenig.
- Heute möchte ich die Entstehung dieser Eigenschaften wie auch die Umwandlung der Luftmasse auf ihren Transportweg erläutern.
- Temperatur und Feuchte in den höheren Luftschichten lassen sich am besten in einem thermodynamischen Diagramm untersuchen.
- Später werde ich die Grundlagen solcher Diagramme herleiten und erläutern.

## Fronten

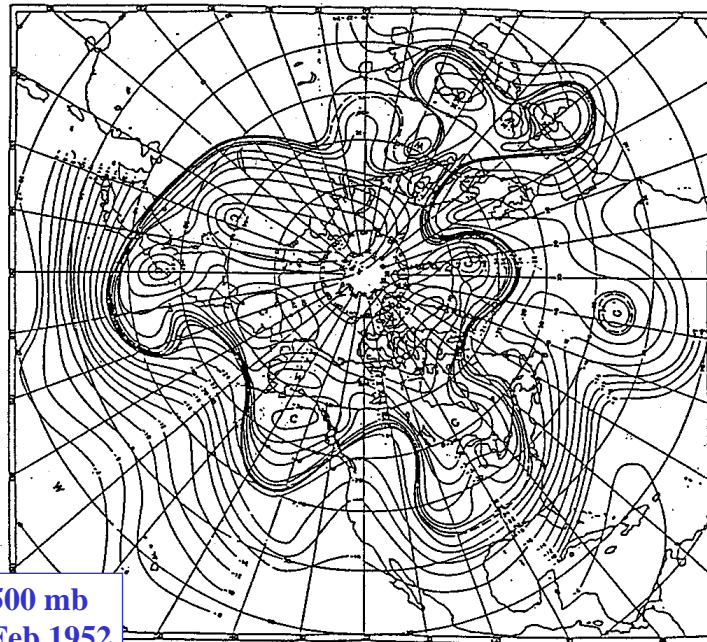
- Zwischen zwei verschiedenen Luftmassen bildet sich eine geneigte Grenzfläche (**Frontfläche**) an, der die schwere Kaltluft unter die leichtere Warmluft schiebt.



## Polarfront

- In einer vereinfachten Vorstellung von der allgemeinen Zirkulation in der Atmosphäre werden die tropische Luft und die Polarluft durch eine einzige Front getrennt - die sogenannte „**Polarfront**“.
- Die Polarfront umschließt nach dieser Vorstellung praktisch die ganze Hemisphäre.



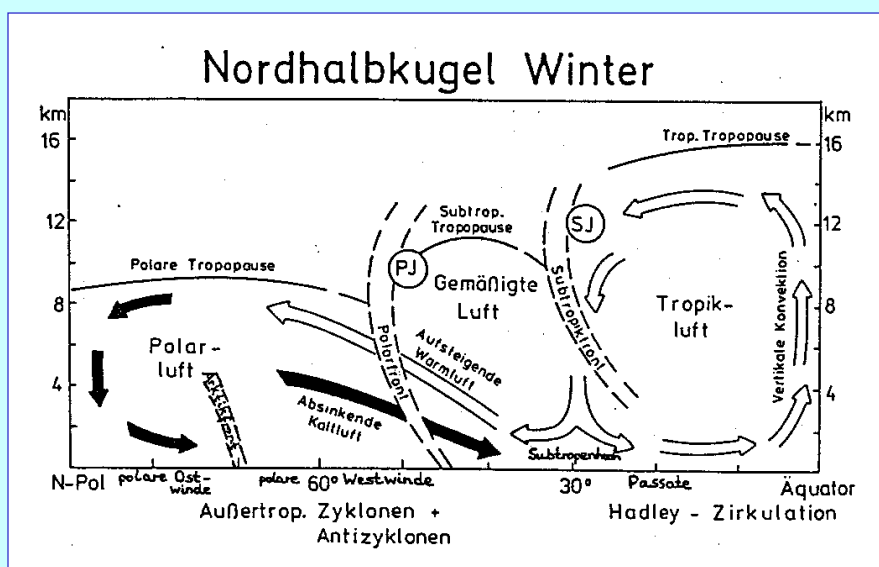


500 mb  
6 Feb 1952

- In den unteren Troposphäre ist die Temperaturgradient an der Front häufig noch stärker, obwohl nur an einigen Stellen.
- Dazwischen liegen größere Gebiete, in denen die Polarfront fehlt. Hierfür gibt es zwei Gründe:
  1. Im Bereich von Tiefdruck- und Hochdruckgebieten der mittleren Breiten entstehen Luftmassen, deren Temperaturen zwischen denen von tropischer und polarer Luft liegen. Die Polarfront wird dadurch in mehrere Teile aufgespalten.
  2. Kontinente können weniger Wärme speichern als Ozeane. Wo kalte kontinentale Luftmassen auf warme maritime Luftmassen treffen (z.B. an den Ostküsten von Nordamerika und Asien), ist deshalb der Temperaturgegensatz in der Atmosphäre besonders hoch.

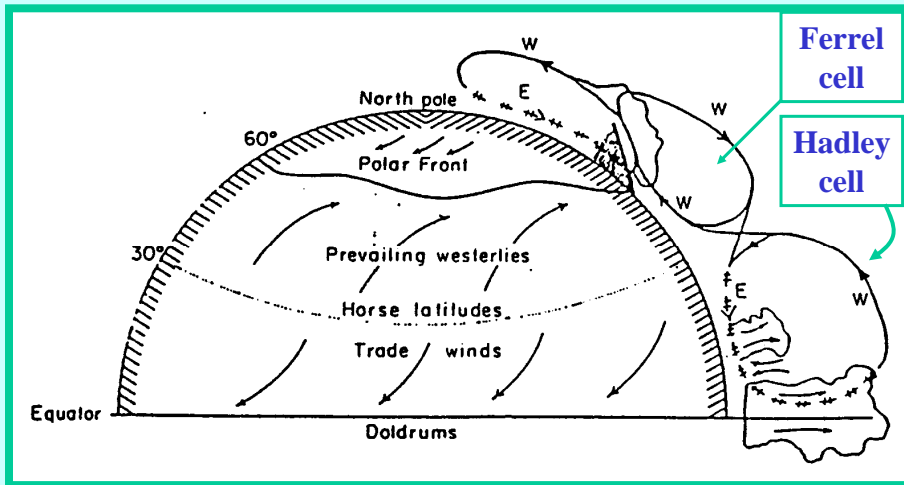
## Entstehung und Transformation von Luftmassen

- Die Luft erhält bestimmte spezifische Eigenschaften, wenn über mehrere Tage die gleichen physikalischen Einflüsse (solche Einflüsse sind z.B. Strahlung, turbulenter und konvektiver Austausch und Verdunstung vom jeweiligen Untergrund her) auf sie einwirken.
- Ursprünglich unterschied man nur zwei Luftmassen, die Polarluft (P) und die Tropikluft (T). Diese Luftmassen sind durch die Polarfront getrennt.
- Die Situation ist aber wesentlich komplizierter.
- Das nächste Bild zeigt ein Nord-Süd-Querschnitt der mittleren Luftbewegungen in der Atmosphäre.



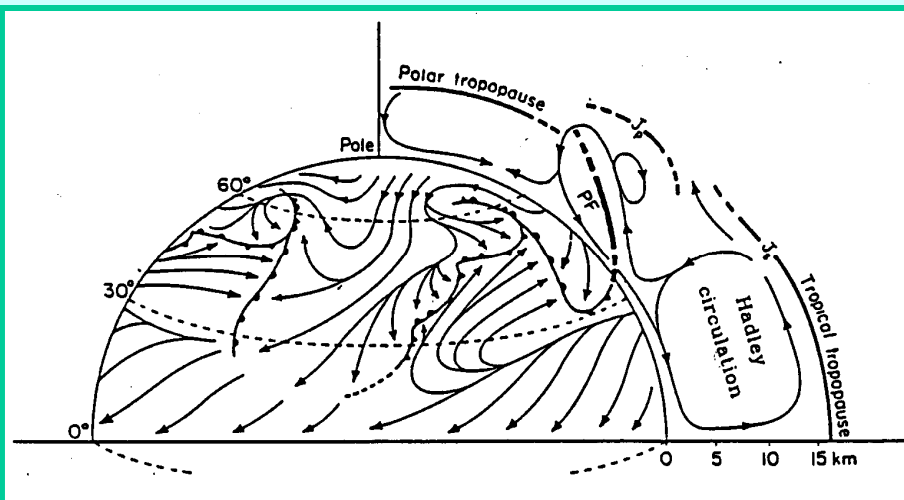
Es ist klar, daß die Einteilung noch ergänzt werden muß!

**Zonal mean meridional circulation**



**The three-cell meridional circulation pattern**

(after Rossby, 1950)



**The mean meridional circulation and main surface wind regimes.**

(after Defant, 1958)

## Entstehung und Transformation von Luftmassen 2

- Reine Tropikluft kann bis in mittleren Breiten nur sehr selten vorstoßen, da der subtropische Hochdruckgürtel ihre Ausbreitung nach Norden verhindert.
- Auch stammt die Polarluft oft nicht direkt aus den Polargebieten (arktische Polarluft), sondern häufig aus Grönland oder Skandinavien.
- Die Polarfront trennt also meist subtropische von subpolarer Luft.
- In mittleren Breiten werden durch die rasche Verlagerung von Hochdruck - und Tiefdruckgebieten mit ständiger Änderung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung die Luftmassen vermischt und umgewandelt - gemäßigte Luft.
- Es lassen sich somit 5 Hauptluftmassen unterscheiden.

## Hauptluftmassen

arktische Polarluft (P)

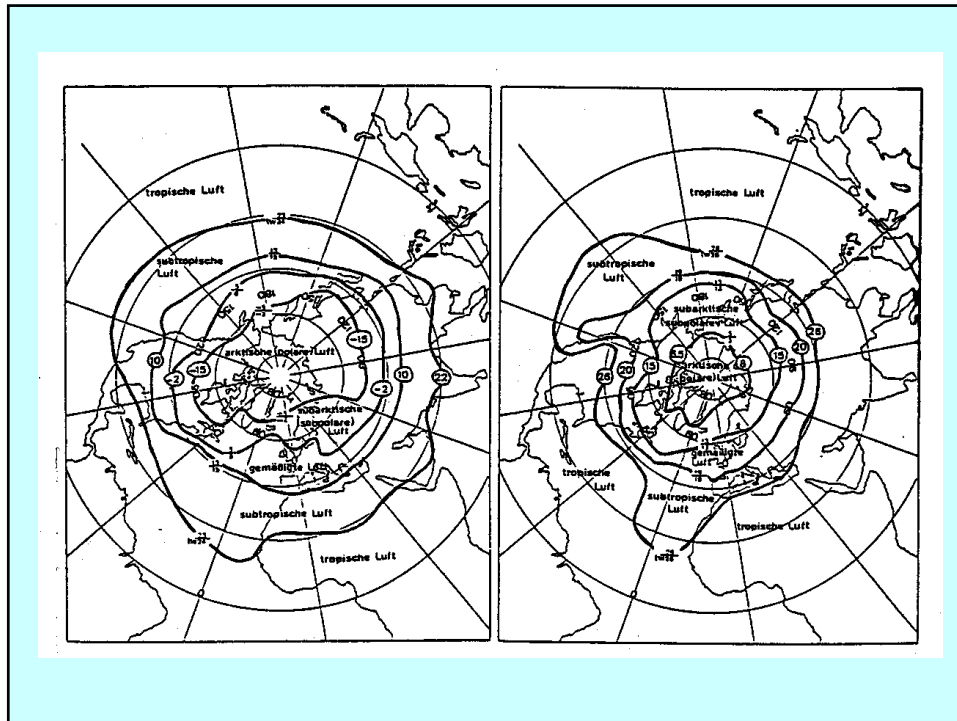
Subpolarluft (P<sub>s</sub>)

gemäßigte Luft (N)

subtropische Luft (T<sub>s</sub>)

Tropikluft (T).

Das nächste Bild zeigt die Verteilung dieser Hauptluftmassen auf der Nordhalbkugel.



## Transformation von Luftmassen

- Eine längere Verweildauer der Luft in einem bestimmten Gebiet setzt geringe horizontale und vertikale Luftbewegung voraus.
- Diese Bedingung ist in ausgedehnten, nahezu ortsfesten Hochdruckgebieten erfüllt, z.B. Subtropenhoch über den Azoren, Kältehoch über Sibirien, und in sich auflösenden, windschwachen Tiefdruckzonen.
- Diese Gebiete werden **Entstehungsgebiete** oder **Quellgebiete** genannt.
- Auf Grund der atmosphärischen Zirkulation strömen die Luftmassen von ihren Entstehungsgebieten auch in andere Regionen (z.B. Polarluft über warmes Meerwasser).

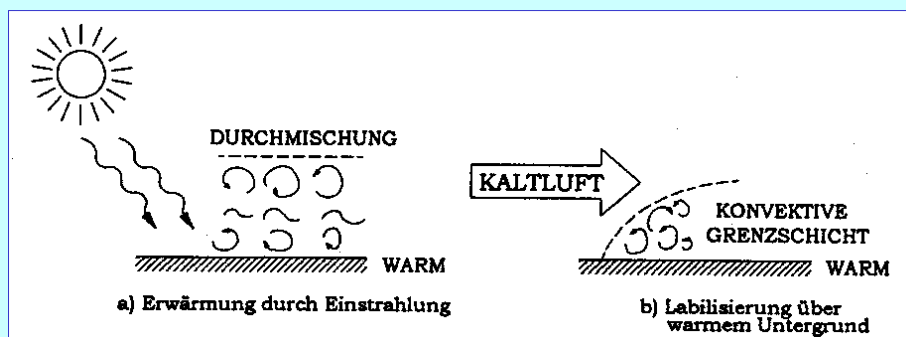


## Transformation von Luftmassen

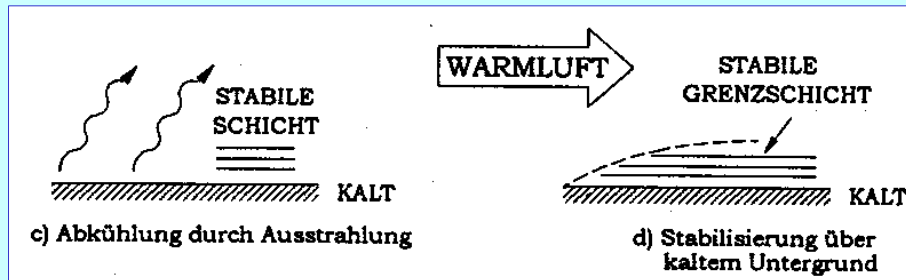
- Bei weitem Transportweg führen die neuen Untergrund- und Strahlungsbedingungen zu einer Umwandlung (**Transformation**).
- Diese Veränderungen haben großen Einfluß auf die Wetterverhältnisse in der Luftmasse.
- Es gibt verschiedene Mechanismen für Luftmassen-  
transformation.
- Einige dieser Mechanismen werden im nächsten Bild gezeigt.



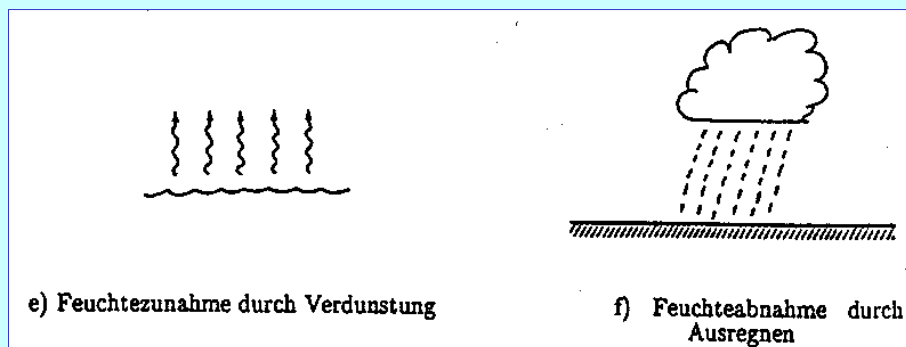
## Erwärmung durch Einstrahlung



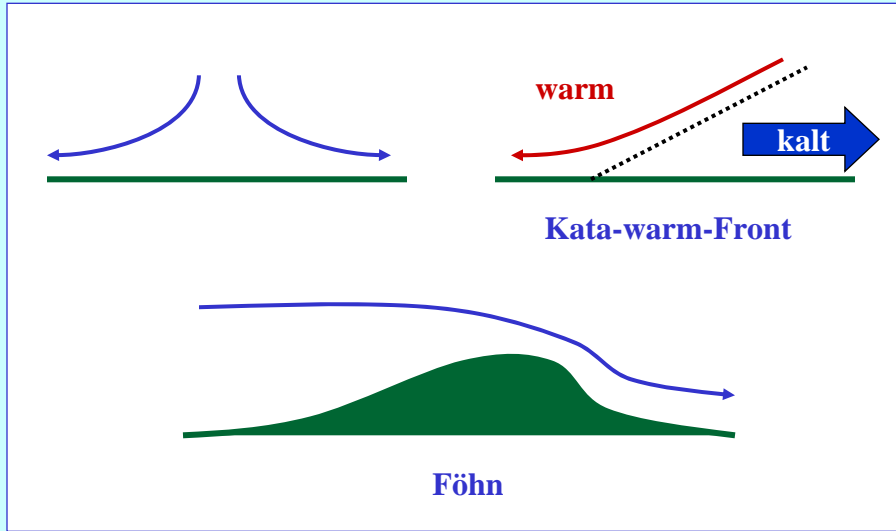
## Abkühlung und Ausstrahlung



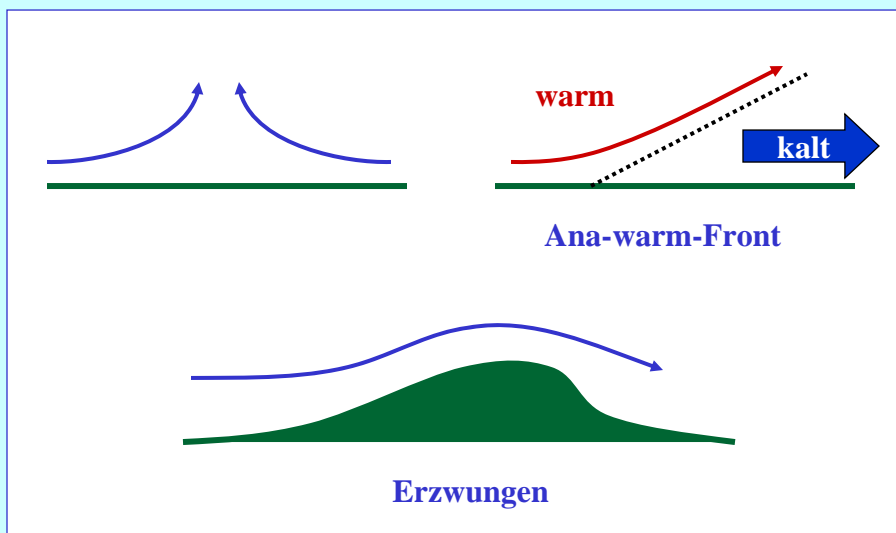
## Labiliesung über warmen Untergrund



## Absinken



## Hebung

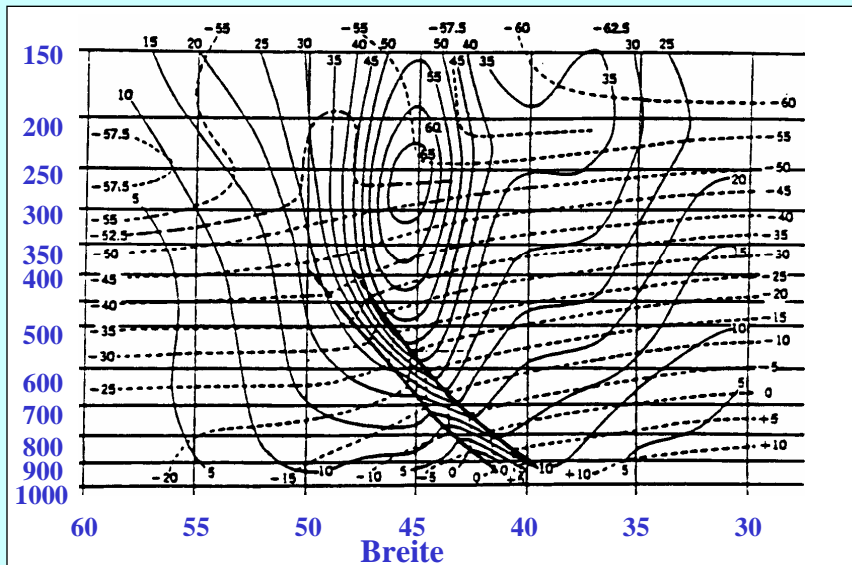


## Fronten



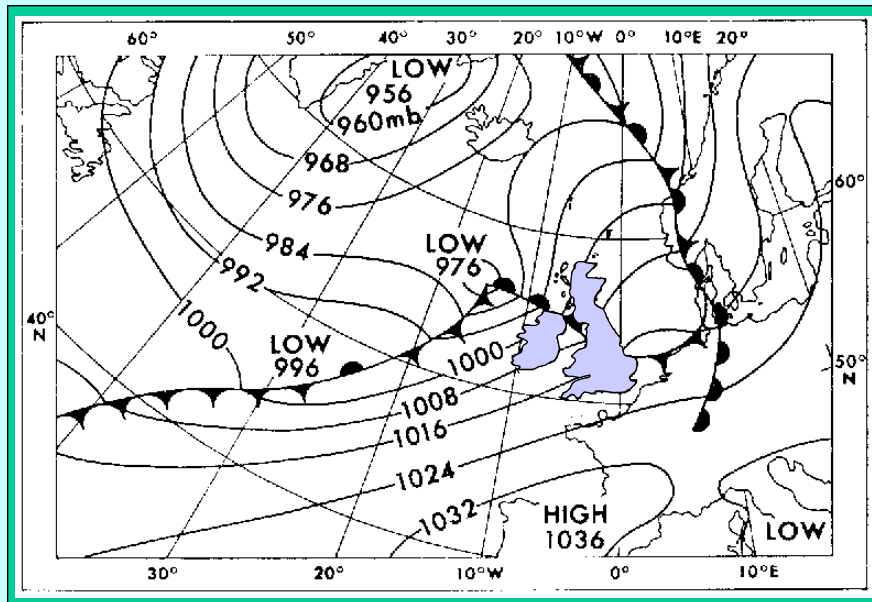
## Fronten

- Eine **Front** ist definiert als “geneigte Ebene” zwischen zwei **Luftmassen** mit mehr oder weniger einheitlichen Eigenschaften.
- Ein Beispiel ⇒ die **Polarfront** in den mittleren Breiten ⇒ ein Gebiet mit relativ starkem horizontalen **Temperaturgradienten**, die die polwärtigen und äquatorwärtigen Luftmassen mit eher einheitlichen Temperaturen voneinander trennt.
- Weitere Beispiele sind **Kalt-** und **Warmfronten**, die mit außertropischen Tiefdruckgebieten zusammenhängen.

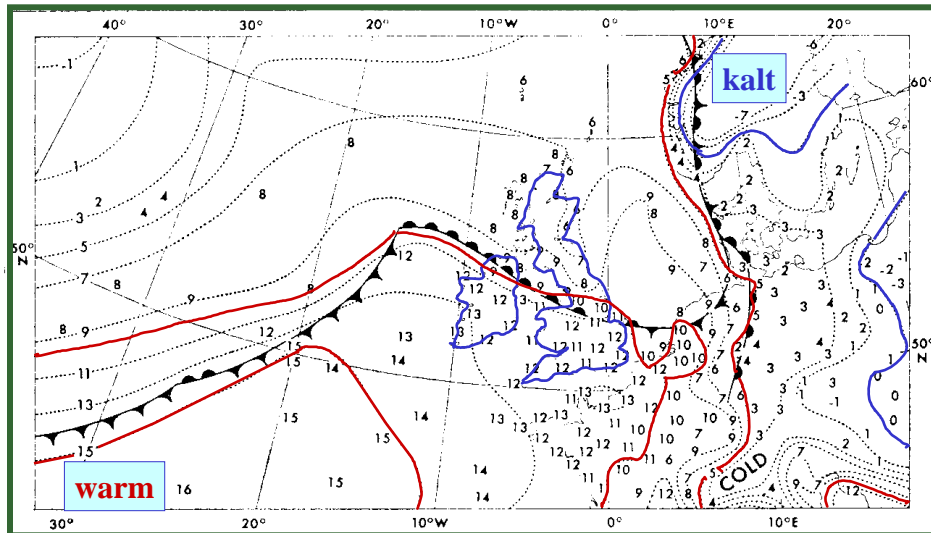


Meridionaler Querschnitt bei 80°W der mittlerer Temperatur und der zonalen Komponente des geostrophischen Windes, zusammengesetzt aus 12 einzelnen Querschnitten, erstellt im Dezember 1946.

### Bodenfronten und Isobaren zum Termin 4 Jan 1957 12Z



## Bodenfronten und Isothermen 04 Jan 1957 12Z



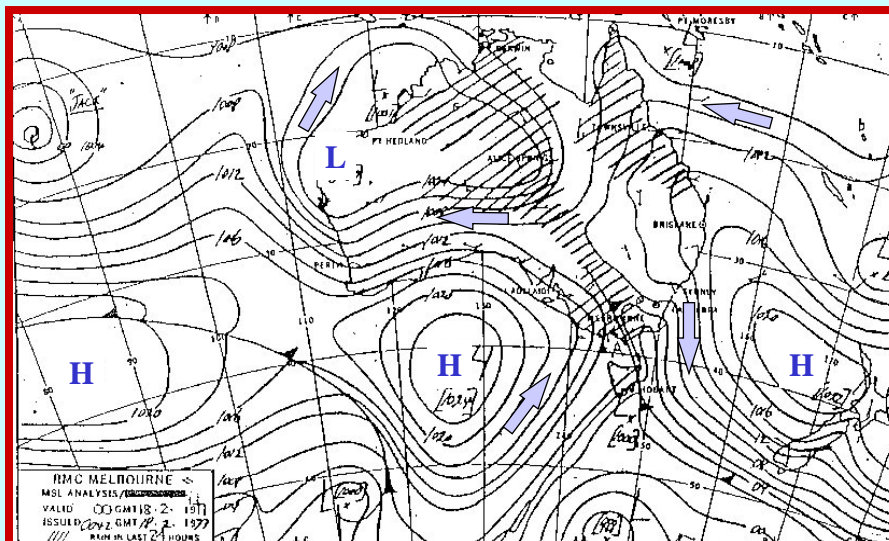
## Eine Kaltfront über München



## Ausgeprägte atmosphärische Fronten

- Zumeist sehr scharfe Temperaturunterschiede entlang der Vorderseite – ein paar Grad über wenige Kilometer Distanz.
- Beispiele:
  - Melbournes berühmte **“Cool Change“** im Sommer,
  - Sydneys **“Southerly Buster“**,
  - Neuseelands **“Southerly Change“**.
- Die ersten zwei sind südostaustralische Frontensysteme, die eine scharfe Übergangsregion zwischen sehr warmen Luftmassen tief im Landesinneren und viel kälterer Luft im südlichen Ozean bilden.

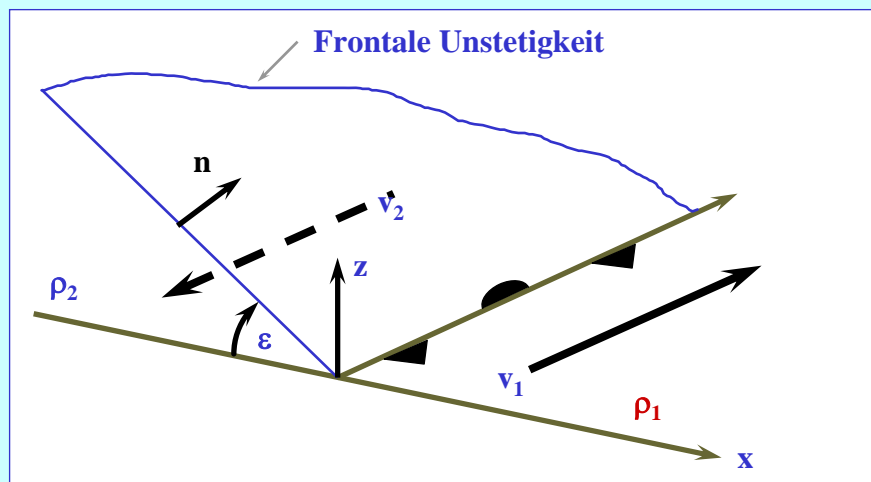
## Bodendruckkarte über Australien



## 'Southerly Buster' über Sydney, Australien



## Margules Modell



Das einfachste Modell stellt eine Frontale "Unstetigkeit" dar. Die Front wird idealisiert als eine scharfe, flache Unstetigkeit der Temperatur, die zwei reibungsfreie, homogene, geostrophische Strömungen voneinander trennt.



## Annahmen für das Modell von Margules

- (i) die **Boussinesq Approximation**; insbesondere, dass die Temperaturdifferenz zwischen den Luftmassen klein ist.
- Es gilt  $(T_1 - T_2)/T^* \ll 1$ ,  $T^* = (T_1 + T_2)/2$  ist die mittlere Temperatur der zwei Luftmassen und  $T_2$  ist die Temperatur der Kaltluft.
- (ii) die Strömung ist überall parallel zur Front, entlang der Front gibt es keine Änderung der Strömung:  $\partial/\partial y \equiv 0$ .
- (iii) Keine Diffusion; die frontale Unstetigkeit bleibt unverändert.

## Bewegungsgleichungen

Geostrophische Gleichung

$$-fv = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial p'}{\partial x}$$

$$fu = 0$$

Störungsdruck

Hydrostatische Gleichung

$$0 = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial p'}{\partial z} + g \left[ \frac{T - T_2}{T_*} \right]$$

Herleitung

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

## Hydrostatische Gleichung

**Allgemein**

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho$$

**In der Kaltluft**

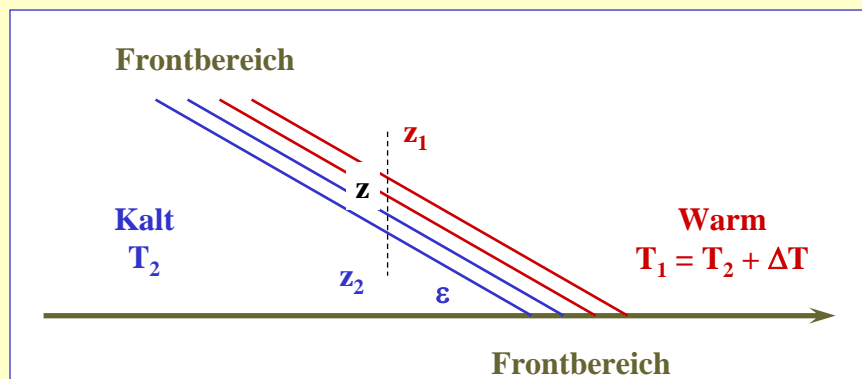
$$\frac{\partial p_2}{\partial z} = -g\rho_2$$

$\rightarrow \frac{\partial}{\partial z} \overbrace{(p - p_2)}^{p'} = -g(\rho - \rho_2)$ 
 $\rho = p/RT$

$\rightarrow \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial}{\partial z} (p - p_2) = -g \frac{(\rho - \rho_2)}{\rho^*} \approx g \frac{(T - T_2)}{T^*}$

$\rightarrow 0 = -\frac{1}{\rho^*} \frac{\partial p'}{\partial z} + g \left[ \frac{T - T_2}{T^*} \right]$

Wir betrachten Margules' Lösung als **Grenzfall** für die Situation, wo der Temperaturgradient sehr klein ist, ausser an der Front selbst.



Entlang einer Isotherme gilt  $\Delta T = \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z = 0$   $\rightarrow$

Sei  $\varepsilon(x,z)$  die lokale Neigung einer Isotherm im Frontbereich:

$$\tan \varepsilon = -\frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{\frac{\partial T}{\partial x}}{\frac{\partial T}{\partial z}}$$

Beachte, dass  $\Delta x > 0$   $\Delta z < 0$  bedingt falls, wie gezeigt,  $0 < \varepsilon < \pi/2$ .

Eliminiere p aus

$$-fv = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{und} \quad 0 = -\frac{1}{\rho_*} \frac{\partial p}{\partial z} + g \left[ \frac{T - T_*}{T_*} \right]$$

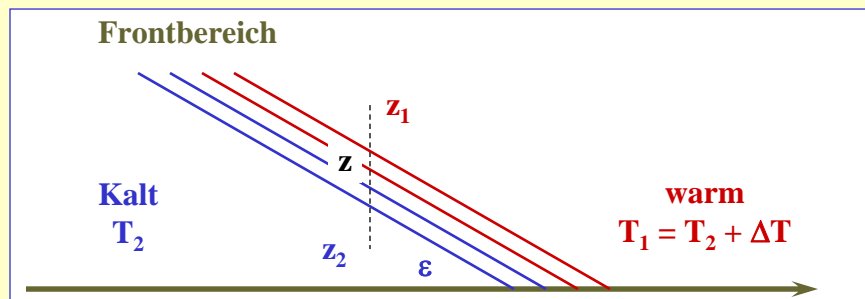


$$f \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho_*} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial z} = \frac{g}{T_*} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{g}{T_*} \tan \varepsilon \frac{\partial T}{\partial z}$$

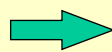
⇒ die **Thermische Windgleichung** ⇒ die **vertikale Scherung des Windes quer zur Front in Abhängigkeit vom horizontalen Temperatur Gradienten.**

Integriere  $f \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho_*} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial z} = \frac{g}{T_*} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{g}{T_*} \tan \varepsilon \frac{\partial T}{\partial z}$

vertikal von  $z_2$  bis  $z$



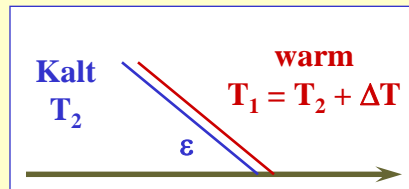
$$v(x, z) = v(x, z_2) + \frac{g}{fT_*} \int_{z_2}^z \tan \varepsilon \frac{\partial T}{\partial z} dz$$



$$v_1 = v_2 + \frac{g}{fT_*} (T_1 - T_2) \tan \varepsilon^*$$

$\varepsilon^*$  ist der Winkel der Isothermen zwischen  $z_2$  und  $z_1$

$$v_1 = v_2 + \frac{g}{f\Gamma_*} (T_1 - T_2) \tan \varepsilon^*$$



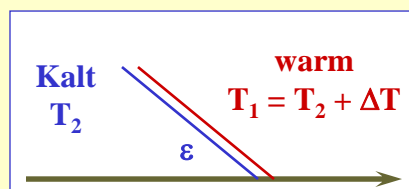
$$\Delta v = \frac{g\Delta T}{f\Gamma_*} \tan \varepsilon^*$$

Margules Formel

Die Margulesformel definiert die Änderung der geostrophischen Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied quer zur Front und der Neigung der Front.

$$\Delta v = \frac{g\Delta T}{f\Gamma_*} \tan \varepsilon$$

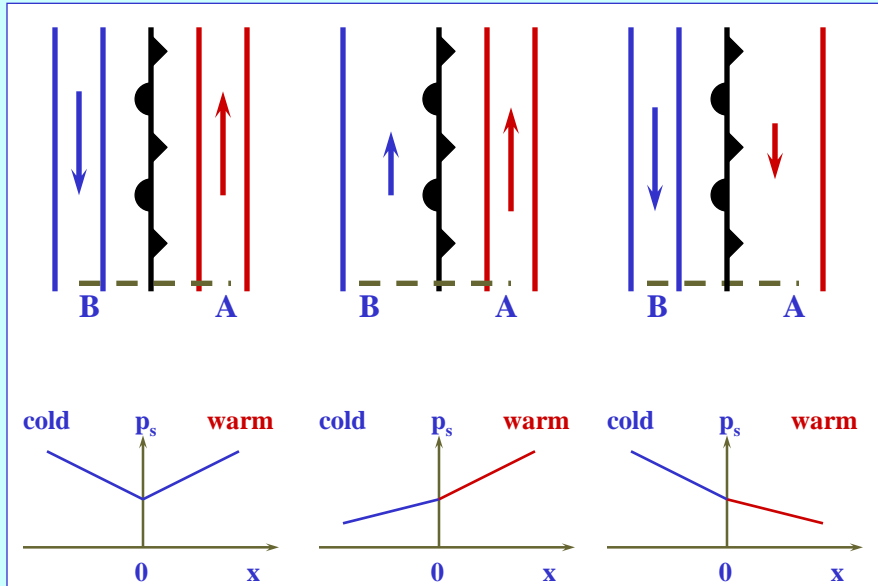
Margules Formel



Beachte: mit  $0 < \varepsilon < \pi/2$  gilt

- (i)  $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ , andernfalls wäre die Strömung instabil bezüglich Schwerewellen
- (ii)  $\Delta v < 0 (> 0)$  falls  $f < 0 (> 0) \Rightarrow$  d.h. es gibt stets einen zyklonalen Sprung in  $v$  parallel zur Front an der Frontvorderseite.
- (iii) Es ist **nicht notwendig**, dass  $v_1 < 0 (> 0)$  und  $v_2 > 0 (< 0)$  getrennt gelten; **nur die Geschwindigkeitsdifferenz ist wichtig.**

## Drei mögliche Konfigurationen



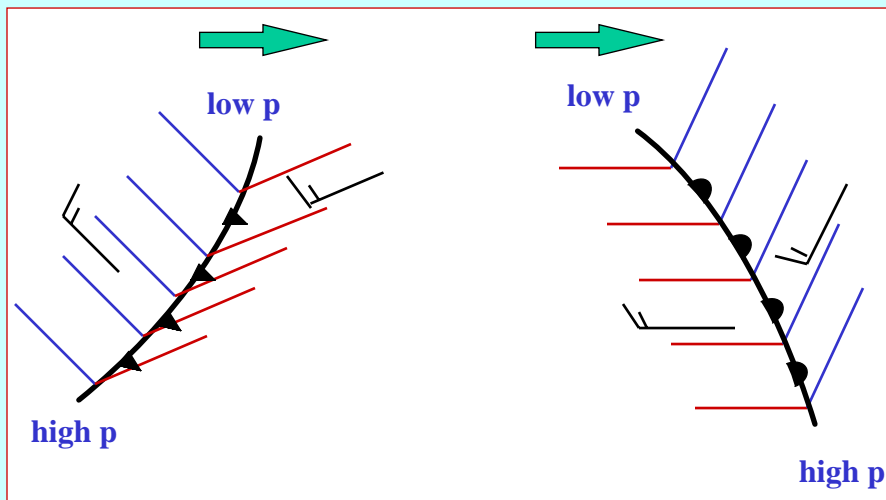
## Einige Bemerkungen

- Margules Lösung für  $v$  (wie gezeigt, mit  $u$  und  $w$  überall null) ist eine **exakte** Lösung der Eulergleichungen im rotierenden System.
- Die Margulesformel stellt eine diagnostische Beziehung dar für eine stationäre oder quasi-stationäre Front; Sie sagt nichts über die Entwicklung (**Frontogenese**) oder die Auflösung (**Frontolyse**) von Fronten aus.
- Die Margulesformel ist von geringem praktischen Nutzen in der Wettervorhersage. Aktive Fronten (verantwortlich für '**signifikantes Wetter**' in den mittleren Breiten) sind stets mit wachsenden Vertikalbewegungen verknüpft, und werden normalerweise von Niederschlag begleitet.

- Die Erweiterung von Margules Modell bezüglich Fronten mit einer einheitlichen geostrophischen Strömung übergeht ist ebenfalls eine problematische Näherung. (Sutcliffe, 1938; Smith, 1990).
- Fronten treten auch über den Ozeanen auf.

Smith, R. K., 1990  
 Surface pressure fields in balanced air mass models of fronts.  
*Mon. Wea. Rev.*, 118, 1922-1926.

[http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/MWR\\_1990\\_Smith.pdf](http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~roger/MWR_1990_Smith.pdf)



Schematische Darstellung einer wandernden **Kaltfront** und einer wandernden **Warmfront**, wie sie auf Bodendruckkarten in der nördlichen Hemisphäre vorkommen. Beachte, dass der scharfe Isobarenknick des Windes die un stetige Neigung der Isobaren widerspiegelt.

Strömungsdeformationen,  
dargestellt mittels eines  
passiven "Tracers" (aus  
Welander 1955)

