

# Wetter

Benjamin Bogner

25.05.2011

# Inhaltsverzeichnis

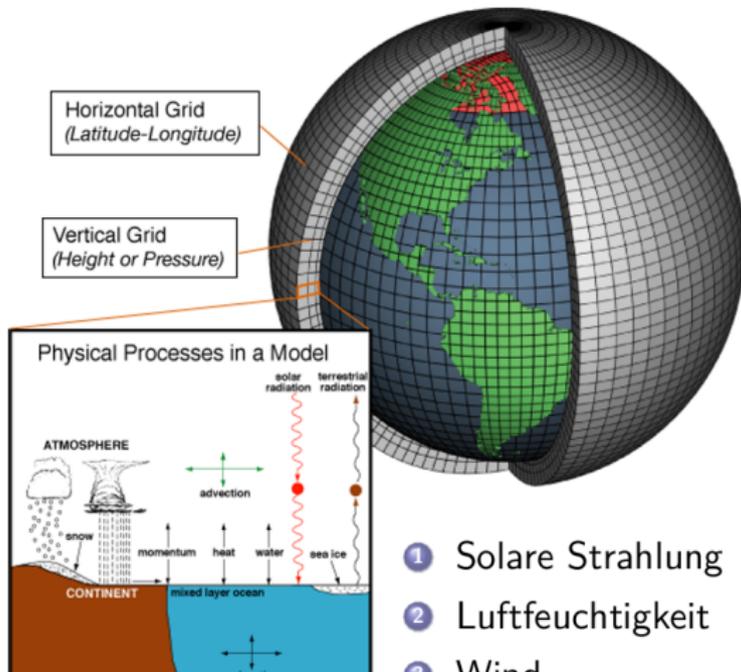
- 1 Definition
- 2 Warum ändert sich das Wetter ständig?
  - Ein einfaches Atmosphärenmodell
  - Ursache der atmosphärischen Bewegungsvorgänge
- 3 Atmosphärische Dynamik
  - Grundgleichungen
  - Der geostrophische Wind
  - Quasi-geostrophische Gleichungen
- 4 Wettervorhersage
  - Messen des Wetters
  - Numerische Wettervorhersage
- 5 Wirbeldynamik
- 6 Zusammenfassung
- 7 Quellen

# Definition

## Wetter

Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt, der vollständig durch die Größen Strahlung, Gasdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind bestimmt ist.

# Vereinfachtes Modell der Troposphäre



- 1 Solare Strahlung
- 2 Luftfeuchtigkeit
- 3 Wind

## Ursache der atmosphärischen Bewegungsvorgänge

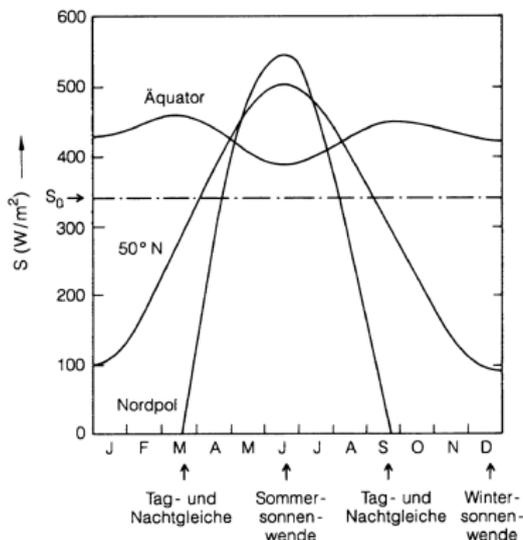


Abbildung: Auf der Erde auftreffende Solare Strahlung, gemittelt über 24h

## Ursache der atmosphärischen Bewegungsvorgänge

Unterschiedlich starke Erwärmung des Erdbodens und der Luft durch Sonnenstrahlung

⇒ Horizontaler Temperaturgradient

⇒ Horizontale Dichte- und Druckgradienten

⇒ **Luftströmungen**

- 1 Definition
- 2 Warum ändert sich das Wetter ständig?
  - Ein einfaches Atmosphärenmodell
  - Ursache der atmosphärischen Bewegungsvorgänge
- 3 Atmosphärische Dynamik
  - Grundgleichungen
  - Der geostrophische Wind
  - Quasi-geostrophische Gleichungen
- 4 Wettervorhersage
  - Messen des Wetters
  - Numerische Wettervorhersage
- 5 Wirbeldynamik
- 6 Zusammenfassung
- 7 Quellen

# Atmosphärische Dynamik

## Wichtigste angreifende Kräfte

$$\vec{F}_G = -m \cdot \nabla \Phi \quad (\text{Schwerkraft})$$

$$\vec{F}_p = -\frac{m}{\rho} \nabla p \quad (\text{Druckgradientenkraft})$$

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot [\vec{\Omega} \times \vec{v}] \quad (\text{Corioliskraft})$$

## Corioliskraft

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot [\vec{\Omega} \times \vec{v}]$$

- nur Richtungsänderung  $\Rightarrow$  Scheinkraft
- an den Polen am Stärksten, verschwindet am Äquator
- bestimmt Drehrichtung von Zyklonen/Antizyklonen

Definition

Warum ändert sich das Wetter ständig?

**Atmosphärische Dynamik**

Wettervorhersage

Wirbeldynamik

Zusammenfassung

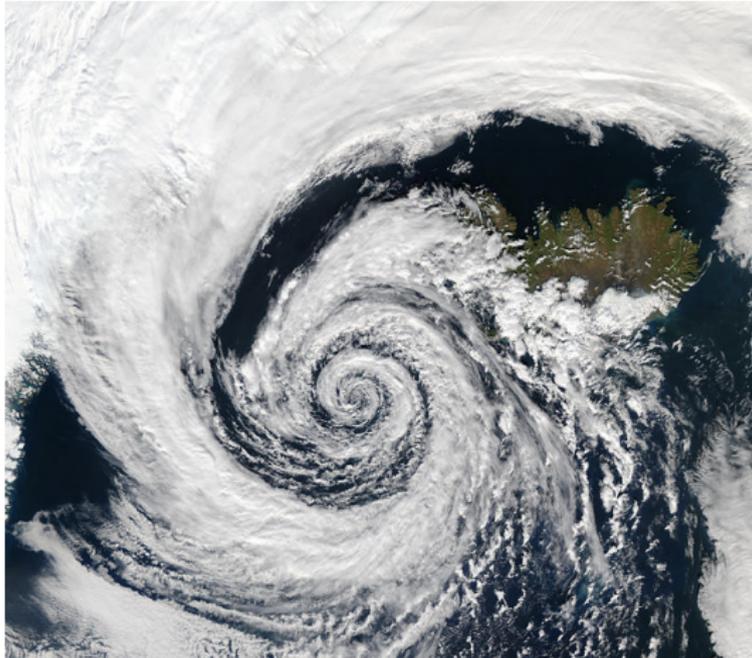
Quellen

Grundgleichungen

Der geostrophische Wind

Quasi-geostrophische Gleichungen

## Corioliskraft



## Grundgleichungen

### Inkompressible Navier-Stokes-Gleichung

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} = -\nabla \Phi - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad \text{mit} \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

### Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \vec{v}$$

### 1. Hauptsatz der Thermodynamik

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T - \frac{1}{\rho \cdot c_p} \frac{dp}{dt} = \frac{\dot{Q}}{c_p}$$

### Zustandsgleichung idealer Gase

$$p = R \rho T$$

# Der geostrophische Wind

## **Problem:**

Bisher vorgestellte Bewegungsgleichungen sind nicht für alle in der Atmosphäre auftretenden Fälle lösbar.

## **Gesucht:**

Einfache Beziehung, mit der man aus einer bekannten großräumigen Druckverteilung die Windgeschwindigkeit abschätzen kann.

# Der geostrophische Wind

Einschränkung der Bewegungsgleichungen:

- Die Strömung besitze nur Horizontalkomponente

$$\vec{v} \rightarrow \vec{v}_h \Rightarrow \frac{\partial \vec{v}_h}{\partial t} + (\vec{v}_h \cdot \nabla_h) \vec{v}_h + f \vec{e}_z \times \vec{v}_h = -\frac{1}{\rho} \nabla_h p$$

- Die Strömung sei beschleunigungsfrei

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = 0$$

## Geostrophische Windgeschwindigkeit

$$\vec{v}_g = \frac{1}{\rho f} \vec{e}_z \times \nabla_h p$$

# Der geostrophische Wind

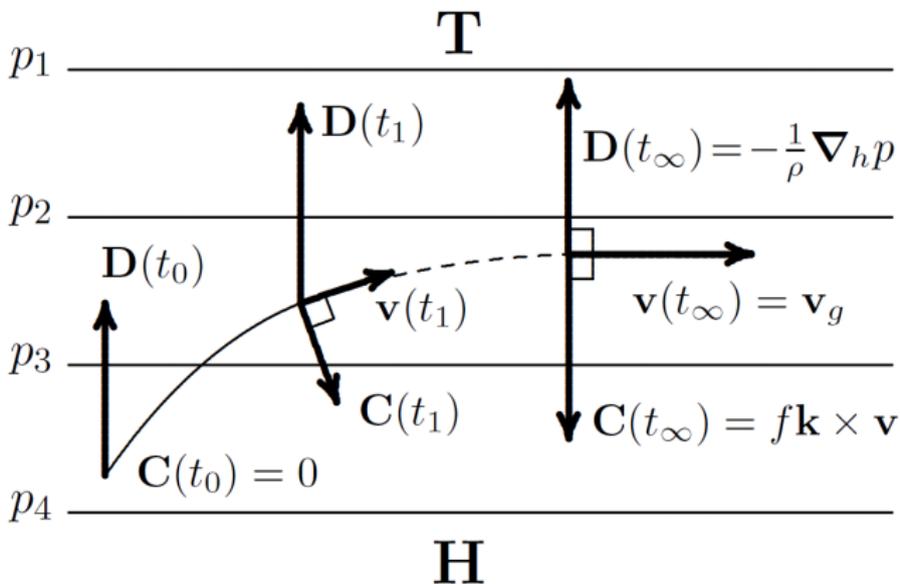


Abbildung: Wirkung von Druckgradienten- und Corioliskraft auf einen fänglich ruhenden Luftpartikel

## Geostrophische Windbeziehung:

Druck- und Corioliskraft im Gleichgewicht, Windvektor immer parallel zu Isobaren

### Aber:

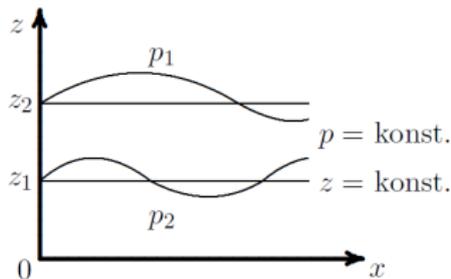
So könnte kein Druckausgleich zwischen Zyklonen und Antizyklonen stattfinden

⇒ Erweiterung nötig

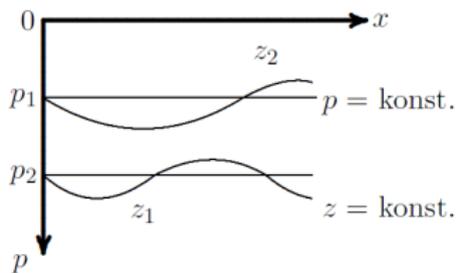
## p-System

- Bisher: z-Komponente entsprach Höhe über NN
- Sondenmessungen liefern Messwerte auf Flächen gleichen Drucks

⇒ Wähle KOS mit Druck als Vertikalkomponente



z-System



p-System

- Betrachte Bewegungsgleichung im p-System

$$\frac{\partial \vec{v}_h}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}_h + f \vec{e}_z \times \vec{v}_h = -\nabla \Phi$$

- Ersetze Druckkraft durch geostrophischen Wind

$$\begin{aligned} (\vec{v}_g &= \frac{1}{f} \vec{e}_z \times \nabla_h \Phi) \\ \frac{d\vec{v}_h}{dt} + f \vec{e}_z \times (\vec{v}_h - \vec{v}_g) &= 0 \end{aligned}$$

- Spalte  $\vec{v}_h$  in geostrophischen und ageostrophischen Anteil

$$\frac{d\vec{v}_h}{dt} = -f \vec{e}_z \times \vec{v}_a$$

⇒ **Zeitliche Änderungen des Windfeldes werden durch Abweichungen vom geostrophischen Gleichgewicht hervorgerufen**

- Betrachte nun Kontinuitätsgleichung im p-System

$$\nabla_p \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial p} = 0$$

- Aufspaltung des Windes

$$\nabla_h \cdot \vec{v}_h = \nabla_h \cdot \vec{v}_g + \nabla_h \cdot \vec{v}_a = \nabla_h \cdot \vec{v}_a = -\frac{\partial w}{\partial p}$$

⇒ **großräumige Vertikalbewegungen in der Atmosphäre werden durch horizontale Divergenzen des ageostrophischen Windes hervorgerufen und umgekehrt**

## Quasi-geostrophische Gleichungen

Um zuverlässigere numerische Wettervorhersagen treffen zu können, wird ein System von Gleichungen benötigt, welches auf den geostrophischen Gleichungen beruht, aber gleichzeitig die für atmosphärische Bewegungen wichtigen Divergenzen des Horizontalwindes berücksichtigt.

⇒ Die quasi-geostrophischen Gleichungen

## Quasi-geostrophische Gleichungen

1. Vorticity-Gleichung (geostrophische Approximation):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{v}_g \cdot \nabla \zeta_g + v_g \beta = f_0 \frac{\partial w}{\partial p}$$

2. Hauptsatz der Thermodynamik (hydrostatische Approximation):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) + \vec{v}_g \cdot \nabla \left( \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) = -\sigma_0 w$$

- 1 Definition
- 2 Warum ändert sich das Wetter ständig?
  - Ein einfaches Atmosphärenmodell
  - Ursache der atmosphärischen Bewegungsvorgänge
- 3 Atmosphärische Dynamik
  - Grundgleichungen
  - Der geostrophische Wind
  - Quasi-geostrophische Gleichungen
- 4 Wettervorhersage
  - Messen des Wetters
  - Numerische Wettervorhersage
- 5 Wirbeldynamik
- 6 Zusammenfassung
- 7 Quellen

## Eingangsdaten

### 1. Schritt der Wettervorhersage: Ermitteln der aktuellen Wetterdaten

Informationen über den Zustand der Atmosphäre liefern:

- Thermometer
- Barometer
- Hygrometer
- Windsack
- Anemometer
- Niederschlagsmesser
- Wolken
- Wettersatellit

## Beispiel: Ultraschallanemometer



- Bestimmung von Windrichtung und -geschwindigkeit über Ultraschallsender/-empfänger
- Frequenzbereich 1-10Hz
- Vorteil: gleichzeitige Erfassung horizontaler und vertikaler Windkomponenten

## Ensemble Forecasting

Numerische Wettervorhersage mittels Monte-Carlo-Methoden:

- basiert auf Modell der quasi-geostrophischen Gleichungen
- viele numerische Berechnungsvorgänge, jeweils mit geringfügig variierten Anfangsbedingungen
- kein Mitteln der Ergebnisse, sondern Berechnung von Wahrscheinlichkeiten
- Erfahrungswerte ebenfalls miteinbezogen

# Ensemble Forecasting

Fehlerquellen:

- limitierte zeitliche und räumliche Auflösung der Eingangsdaten
- falsch erfasste Eingangsdaten
- Näherungen im Modell
- chaotisches Verhalten in der Atmosphäre

## Beispiel: Global Forecast System

- Wettervorhersagemodell der „National Oceanic and Atmospheric Administration“
- 4 mal täglich neu berechnet
- 2 Teile: hochaufgelöste Berechnung der nächsten 7 Tage, dann weitere 1-2 Wochen in niedrigerer Auflösung
- horizontale Auflösung: Quadrate von 35 oder 70km Kantenlänge
- vertikale Auflösung: Aufteilung der Toposphäre in 64 Schichten
- Zeitauflösung: 3-12h

# Entstehung von Tornados

## Voraussetzungen:

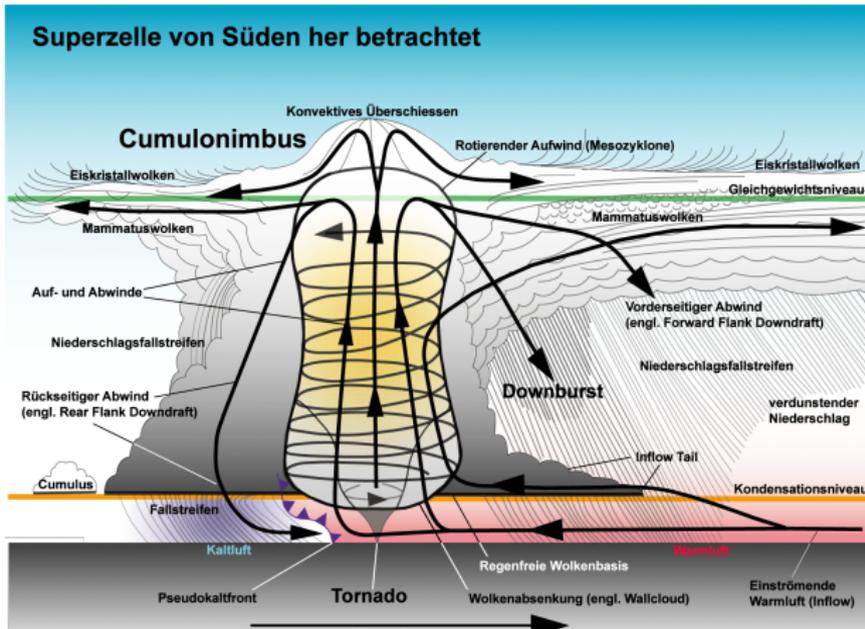
- starker vertikaler Temperaturgradient
- ausreichendes Feuchteangebot in den unteren 1-2km der Atmosphäre
- Hebung der Luftmasse (Sonnenstrahlung, Fronten)

## Energielieferant:

im Wasserdampf gespeicherte latente Wärme, die bei Kondensation freigesetzt wird

# Mesozyklonale Tornados

starke vertikale Windscherung  $\Rightarrow$  Ausbildung von Superzellen



- Sonne ist treibende Kraft des Wetters
- Modellierung nur unter starken Vereinfachungen möglich
- Vorhersage aufgrund des chaotischen Fluid-Verhaltens schwer
- zuverlässigste Methode: Ensemble Forecasting

Definition

Warum ändert sich das Wetter ständig?

Atmosphärische Dynamik

Wettervorhersage

Wirbeldynamik

**Zusammenfassung**

Quellen

Danke für die Aufmerksamkeit

- Dieter Etling: **Theoretische Meteorologie**
- Wikipedia
- Wetter.com