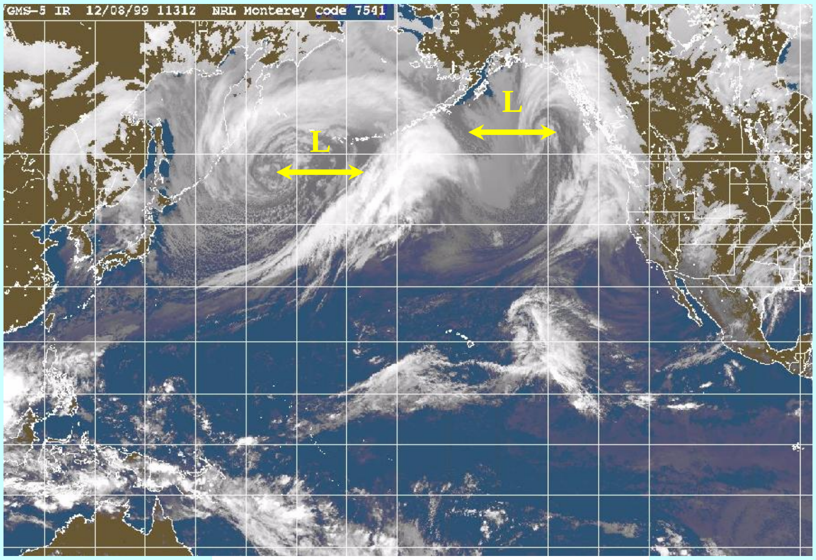

Dynamik der Atmosphäre

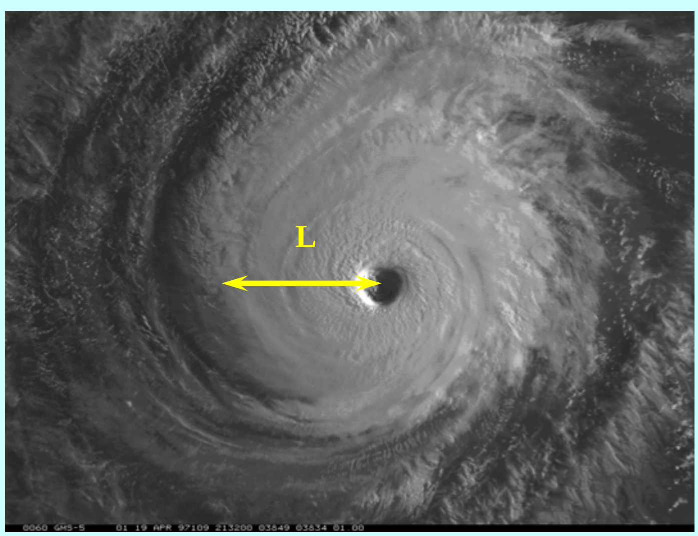

Einige Phänomene

Extratropische Zyklone



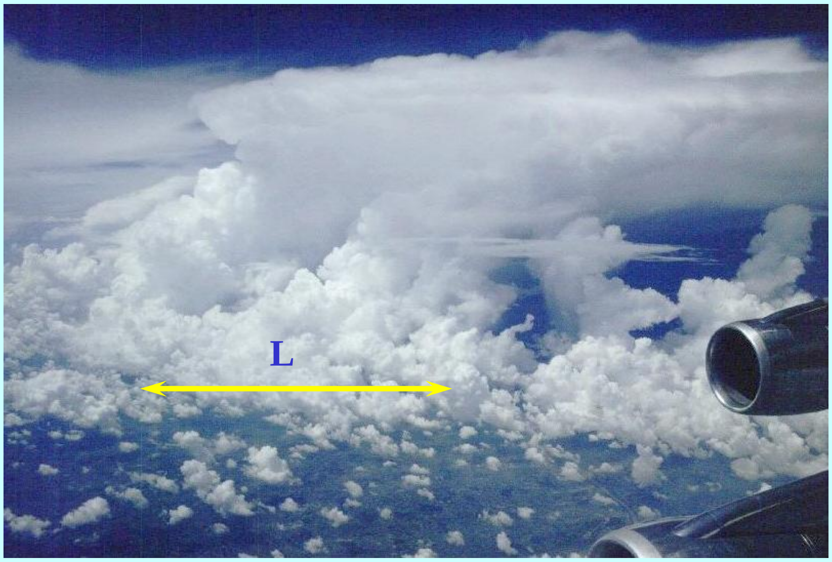
L = 1000 km   U = 10 m/sec

Tropische Zyklon, Hurrikan, Taifun



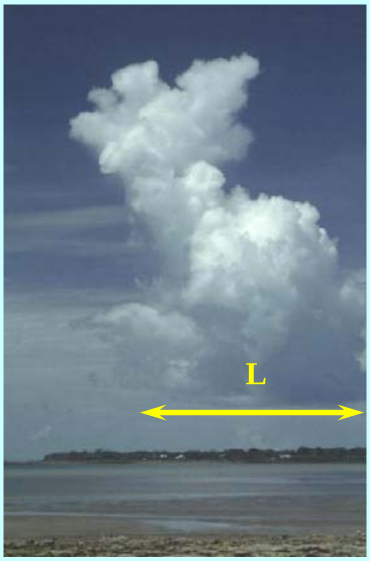
L = 500 km   U = 50 m/sec

Cumulonimbuswolke



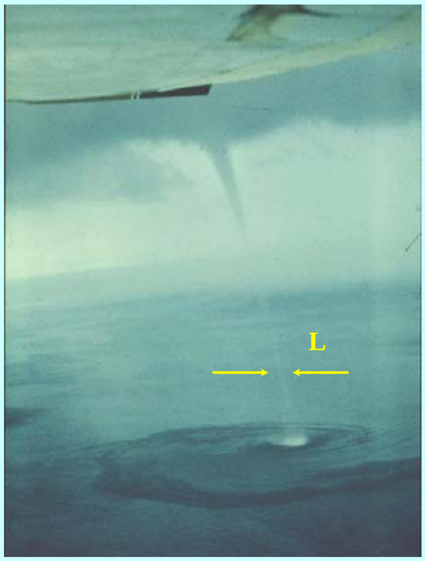
L = 10 - 50 km   U = 10 - 20 m/sec

Cumuluswolke



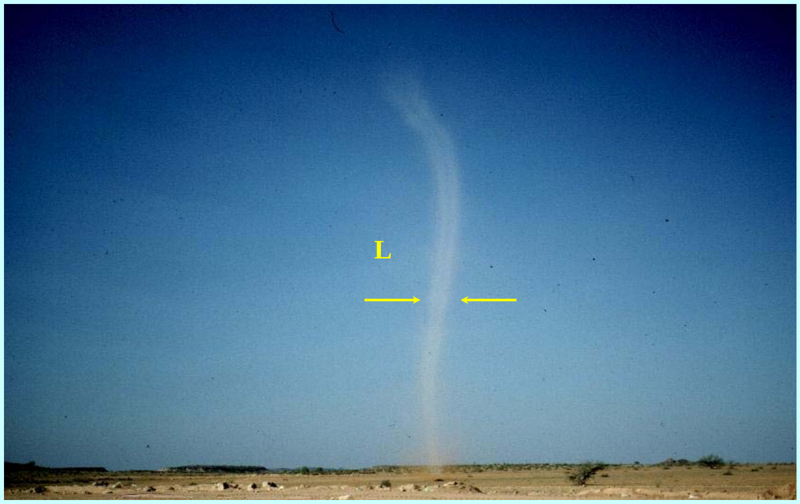
L = 100 - 1000 m   U = 10 m/sec

Wasserhose - waterspout



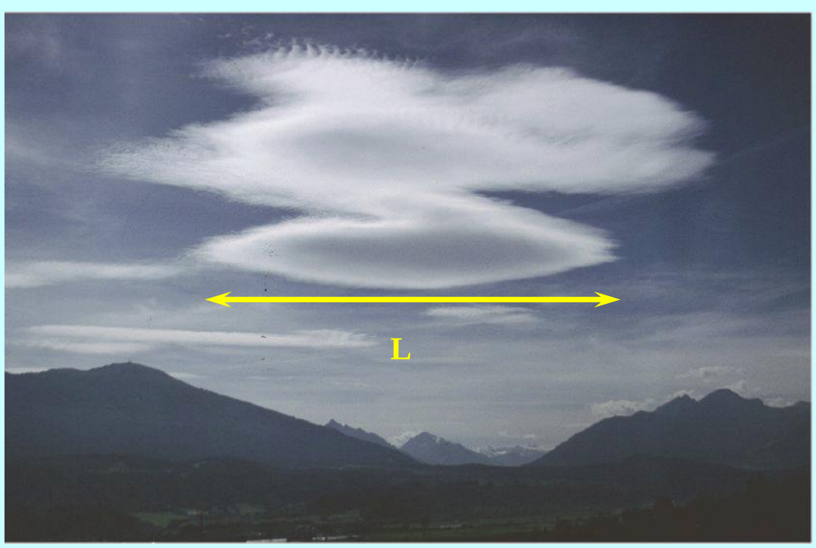
L = 100 m   U = 50 m/sec

Staubteufel – dust devil



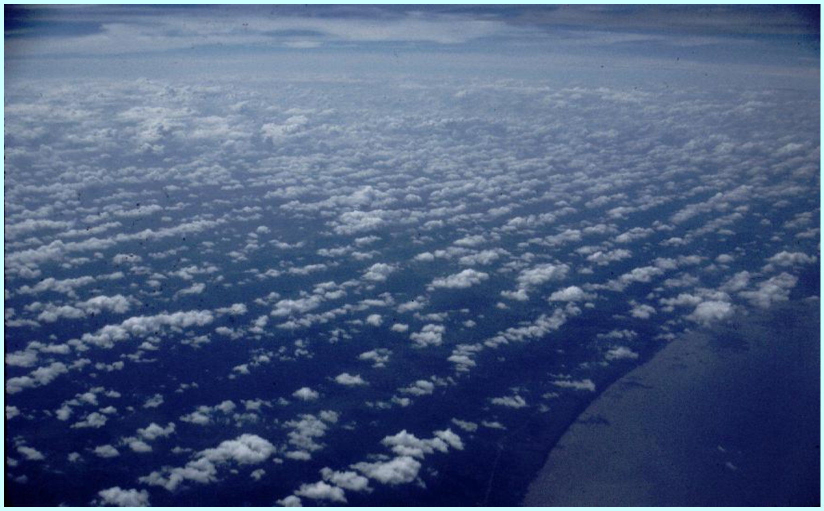
L = 10 - 100 m U = 10 m/sec

Wellenwolken – wave clouds



L = 10 km U = 10 m/sec

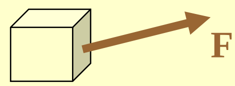
Wolkenstrassen – cloud streets



Blocking - Luftstau

Dynamik der Atmosphäre

- Bewegungsvorgänge in der Atmosphäre entstehen, wenn Kräfte F auf die Luftteilchen wirken.



- Die Atmosphäre besteht aus Gasen
- Für Luftströmungen gelten die Gesetze der Hydrodynamik

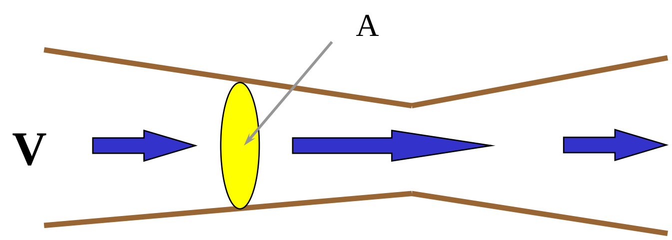
Die Gesetze der Hydrodynamik

- Das 2 Gesetz von Newton

Masse × Beschleunigung = Kraft

- Anders als bei der Bewegung eines Festkörpers muß bei der Strömung eines Gases (oder einer Flüssigkeit) noch eine zusätzliche Bedingung erfüllt sein: =>
- Die Kontinuitätsgleichung oder Massenerhaltungsgleichung

Kontinuitätsbedingung



Keine Masse wird im Rohr erzeugt

$\Rightarrow$ VA = konstant

Die Erdrotation

- **Die Erde dreht mit einer Winkelgeschwindigkeit**

$$\Omega = \frac{2\pi}{(60 \cdot 60 \cdot 24\mathrm{s})} \approx 7{,}3 \times 10^{-5}\,\mathrm{s}^{-1}$$

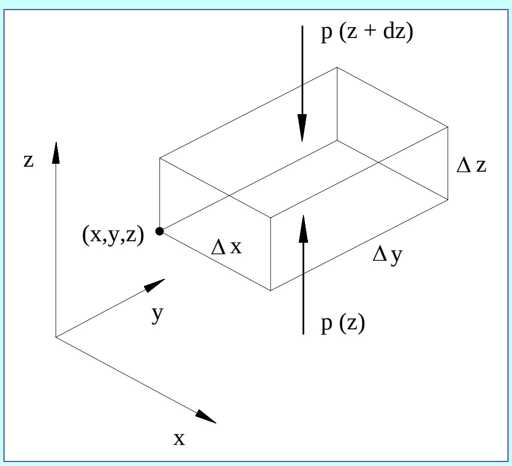
- **Diese Drehung erschwert die Aufstellung einer Bewegungsgleichung für Luftströmungen in der Atmosphäre**
- **Wir brauchen ein rotierendes Koordinatensystem!**

Newton’sche Gesetz in einem rotierenden Koordinatensystem

- **Ein Luftpaket mit Einheitsvolumen** 1 m^3 **hat Beschleunigung**
  - **a in einem Inertialsystem**
  - **a´ in einem Bezugssystem, das sich mit der Erde bewegt**
- **Sei a´´ = a - a´ Newton =>**

$$\boxed{\rho\mathbf{a} = \rho\mathbf{a}' + \rho\mathbf{a}'' = \mathbf{F}} \quad \textbf{oder} \quad \boxed{\rho\mathbf{a}' = \mathbf{F} - \rho\mathbf{a}''}$$

Mathematische Formulierung der Bewegungsgleichung



Kräfte **F**

- **Es gibt drei verschiedene Arten von Kräfte:**
  - **Körperkräfte**
  - **Druckkräfte**
  - **Reibungskräfte**

Körperkräfte

- **Körperkräfte oder Volumenkräfte sind Kräfte, die zur Masse proportional sind.**
  - **Beispiele sind die Gravitationskraft und die Corioliskraft (im rotierenden Bezugssystem)**

Druckgradientkraft

Druckkräfte sind Kräfte, die senkrecht auf die Seitenflächen des Luftpakets wirken

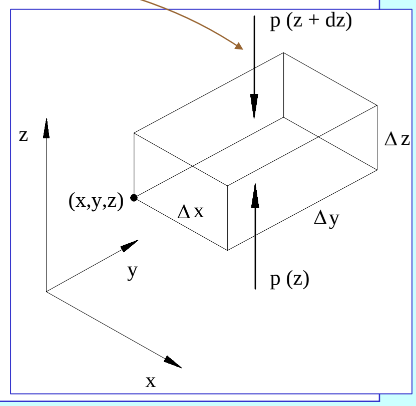
Druck ist einfach Kraft pro Einheitsfläche

Netto-Druckkraft in z-Richtung

$$p(x,y,z)\Delta x\Delta y - p(x,y,z+\Delta z)\Delta x\Delta y$$

$$\approx -\frac{\partial p}{\partial z}\Delta x\Delta y\Delta z$$

$$\approx -\frac{\partial p}{\partial z}$$ **pro Einheitsvolumen**

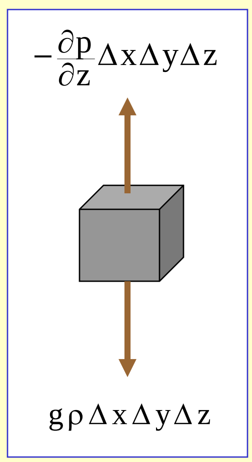


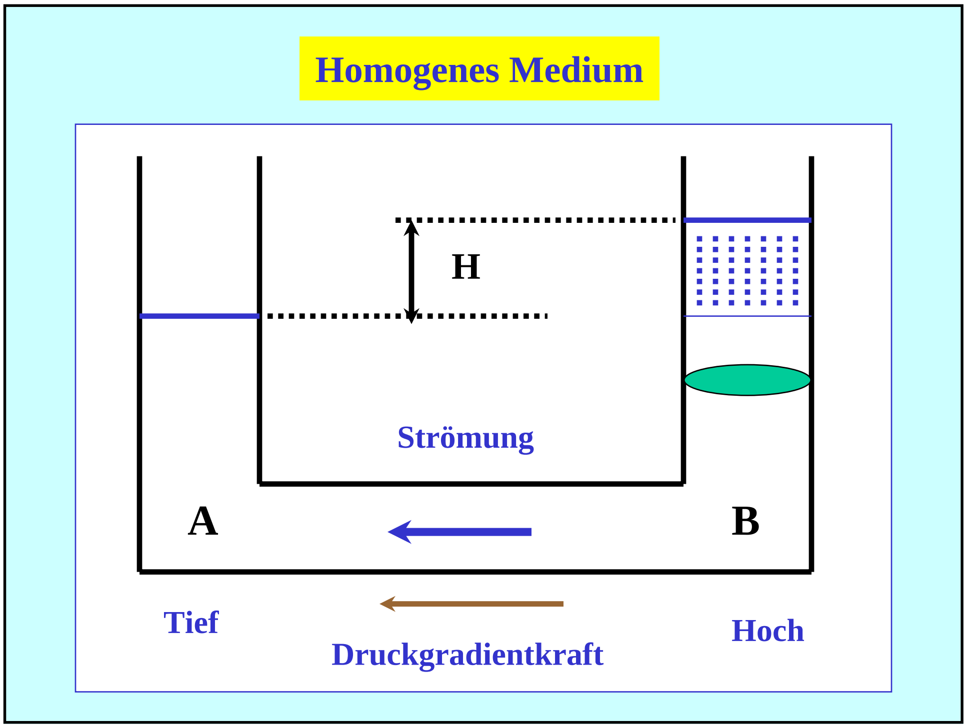
Hydrostatisches Gleichgewicht

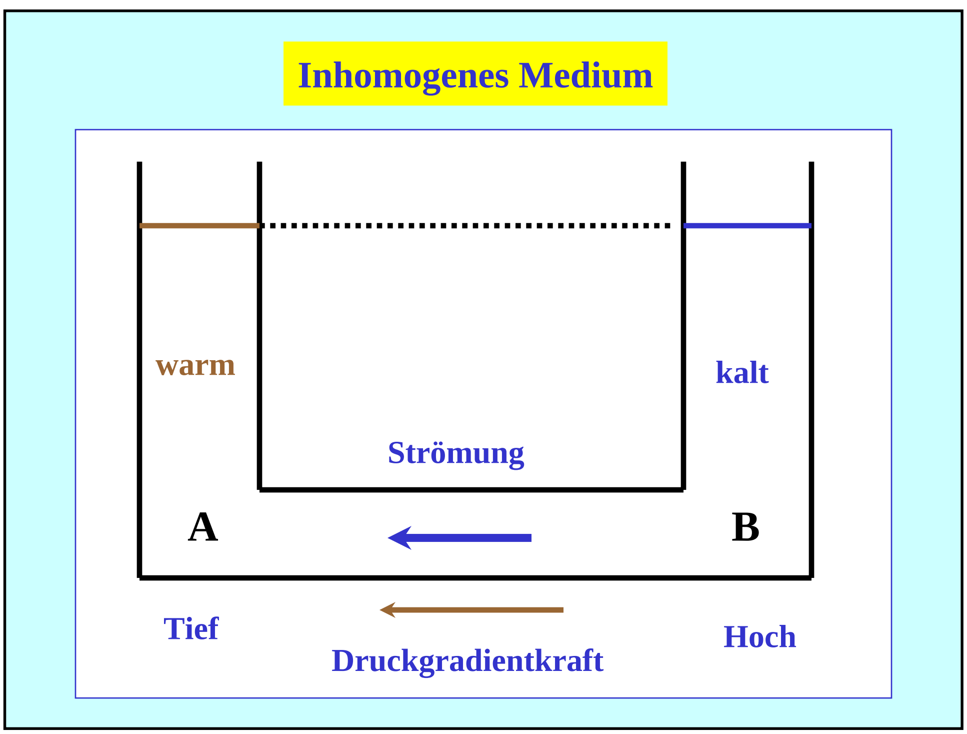
- **die nach oben gerichtete Druckkraft:** $-\frac{\partial p}{\partial z}$ **steht im Gleichgewicht zur Gravitationskraft:** $g\rho\Delta x\Delta y\Delta z$.

- **aus diesem Gleichgewicht erhält man die hydrostatische Gleichung**

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




Homogenes Medium
H
Strömung
A
B
Tief
Druckgradientkraft
Hoch


Inhomogenes Medium
warm
kalt
Strömung
A
B
Tief
Druckgradientkraft
Hoch

Horizontale Druckgradientkraft

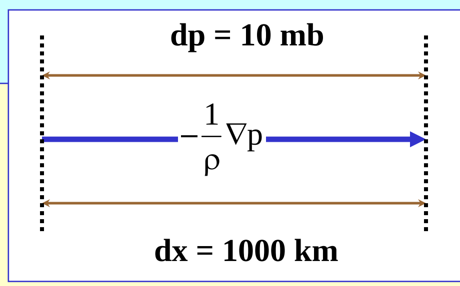
- **Ursache Wenn die Luft in Bewegung ist, sind die horizontalen Komponenten des Druckgradientenkraft von Bedeutung.**

Dies sind: $-\frac{\partial p}{\partial x}\Delta x \Delta y \Delta z$ **in x-Richtung**

$-\frac{\partial p}{\partial y}\Delta x \Delta y \Delta z$ **in y-Richtung**

- **Die gesamte Druckgradientkraft auf das Luftpaket ist gleich dem Vektor** $-\nabla p$ **pro Einheitsvolumen, oder**
  = $-(1/\rho)\nabla p$ **pro Einheitsmasse**

Atmosphärisches Beispiel



$$\left|\frac{1}{\rho}\nabla p\right| \approx \frac{1}{1\ \mathrm{kg}/\mathrm{m}^3} \times \frac{10^3\ \mathrm{Pa}}{10^6\ \mathrm{m}} = 10^{-3}\ \mathrm{m\,s}^{-2}$$

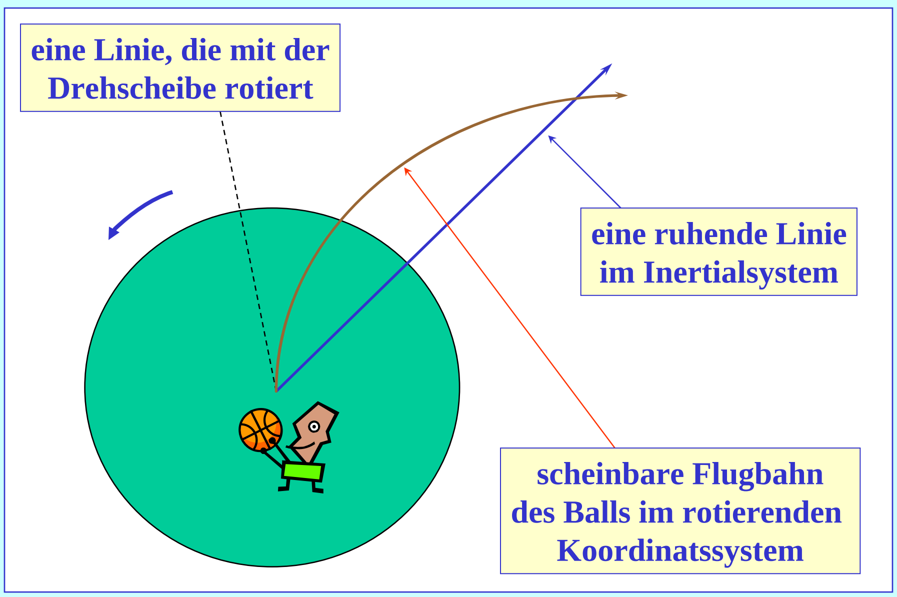
In einem Tag (= 10^5 s)**, diese Beschleunigung wurde eine Geschwindigkeit von** 10^{-3} ms^{-2} × 10^5 s **erzeugen.**

Tatsächlich wird nur circa 10 m s^{-1} **beobachtet!**

- Ursache für diesen Unterschied ist der Einfluß der Erdrotation auf die großräumigen Luftströmungen
- Ein größer Teil der Durckgradientkraft steht im Gleichgewicht mit einer Trägheitskraft, die durch die Erdrotation entsteht
- Dieser Trägheitskraft ist im Term **a´´** auf der rechten Seite der Gleichung $\rho \mathbf{a}' = \mathbf{F} - \rho \mathbf{a}''$ enthalten.

Erklärung der Corioliskraft

Die Corioliskraft



- Der Mann außerhalb des Karussells sieht den Ball auf einer geraden Linie mit konstanter Geschwindigkeit rollen.
- Daraus schließt er noch dem Gesetz von Newton, daß keine Kraft auf den Ball wirkt.
- Vom rotierenden Karussell aus beobachtet man jedoch, wie der Ball nach rechts abgelenkt wird.
- Man folgert nach dem Gesetz von Newton, daß auf den Ball eine Kraft wirkt.

- Wer hat recht?

Natürlich beide haben recht!

- Im Inertialsystem außerhalb des Karussells ist das Newton'sche Gesetz in der Form $\rho\mathbf{a} = \mathbf{F}$ gültig (vorausgesetzt die Erdrotation wird vernachlässigt).
- Beobachtet man keine Beschleunigung, folgt $\mathbf{F} = \mathbf{0}$.
- Im rotierenden Koordinatensystem gilt auch $\mathbf{F} = \mathbf{0}$: es gibt aber noch eine Kraft $\mathbf{a}''$ (mit als Masse des Balls), die die Ablenkung des Balls verursacht.
- Diese Kraft ist nach $\rho\mathbf{a}' = \mathbf{F} - \rho\mathbf{a}''$ gleich der Kraft $-\rho\mathbf{a}''$ (für $\mathbf{F} = \mathbf{0}$).

- **Die Kraft, die auf der rechten Seite der Newton'schen Gleichung hinzugefügt werden muß, wenn die Beschleunigung in einem rotierenden Bezugssystem gemessen wird, nennt man Corioliskraft**
- **Wenn sich das Karussell schneller dreht und die Geschwindigkeit des Balls gleichbleibt, erscheint die Bahn des Balls stärker gekrümmt.**

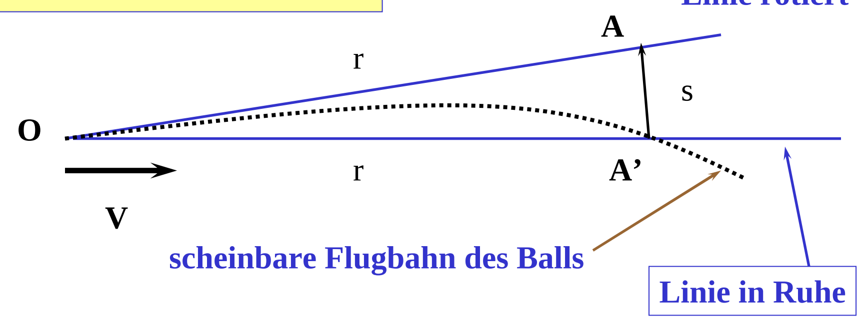
Die Corioliskraft nimmt mit der Winkelgeschwindigkeit zu.

- **Aber Vorsicht! Man darf nicht analog weiter folgen, daß die Corioliskraft abnimmt, wenn der Ball schneller rollt, denn in Wahrheit wird sie größer. Warum?**

Antwort

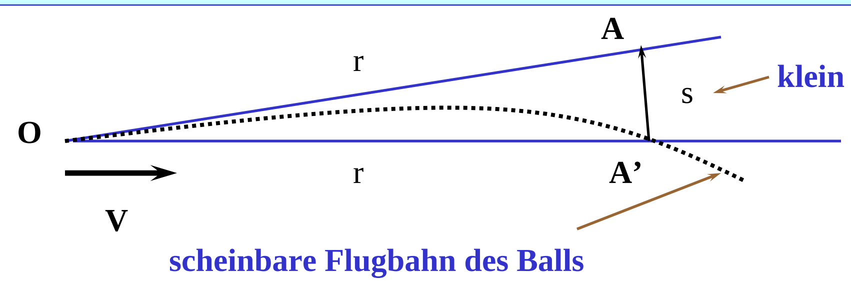
- **Die Krümmung der Flugbahn ist in diesem Fall kein Maß für die Corioliskraft, weil bei größerer Rollgeschwindigkeit** V, **erreicht der Ball den Rand des Karussells schneller d.h. die Zeit, in der die Corioliskraft wirken kann, nimmt ab.**
- **In der Tat, mit einer einfachen Rechnung beweist man, daß die Corioliskraft direkt proportional zu** ω **und** V **ist.**

Ausschnitt der Drehscheibe



- **Die Zeit** t**, die der Ball für die Strecke** OA´ **braucht, ergibt sich aus** r/V**.**
- **Während dieser Zeit legt** A **am Rand der Drehscheibe dieEntfernung** $s = \omega t \times r = \omega V t^2$ **zurück.**

Ausschnitt der Drehscheibe



Aus dem Vergleich mit der bekannten Formel $s = at^2/2$ **würde der Beobachter im Mittelpunkt der Scheibe schließen, daß der Ball nach** A´ **gelangt, weil er die Beschleunigung** $a = 2\omega V$ **erfährt, oder anders ausgedrückt, die Corioliskraft** ma **erfährt.**

Masse des Balls

- Die Corioliskraft kann man nicht nur beobachten, wenn man im Zentrum der Drehscheibe steht, sondern von jedem beliebigen Standpunkt auf der Scheibe aus.
- Es ist gleichgültig, in welche Richtung man den Ball rollt: der Ball wird immer nach rechts abgelenkt.
- Wenn das Karussell im Uhrzeigersinn rotiert, erscheint in allen Fällen die Flugbahn nach links gekrümmt.
- Es stellt sich heraus, daß für die meisten atmosphärischen Bewegungsgänge nur die horizontale Komponente der Corioliskraft von Bedeutung ist.
- Die horizontal Komponente der Corioliskraft pro Einheitmasse (oder Coriolisbeschleunigung) ergibt sich deshalb zu $2\omega V = 2(\Omega \sin\phi)V = fV$ wobei $f = 2\Omega\sin\phi \Rightarrow$ die Coriolisparameter.

- Am Äquator ist $\phi = 0$ und deshalb auch $f = 0$.
- Dort verschwindet die horizontale Komponente der Corioliskraft.
- Die Corioliskraft lenkt auch der Nordhalbkugel den Wind (oder einen Ball) nach rechts ab, denn vom Nordpol ausgesehen dreht sich die Erde gegen den Uhrzeigersinn.


Ende