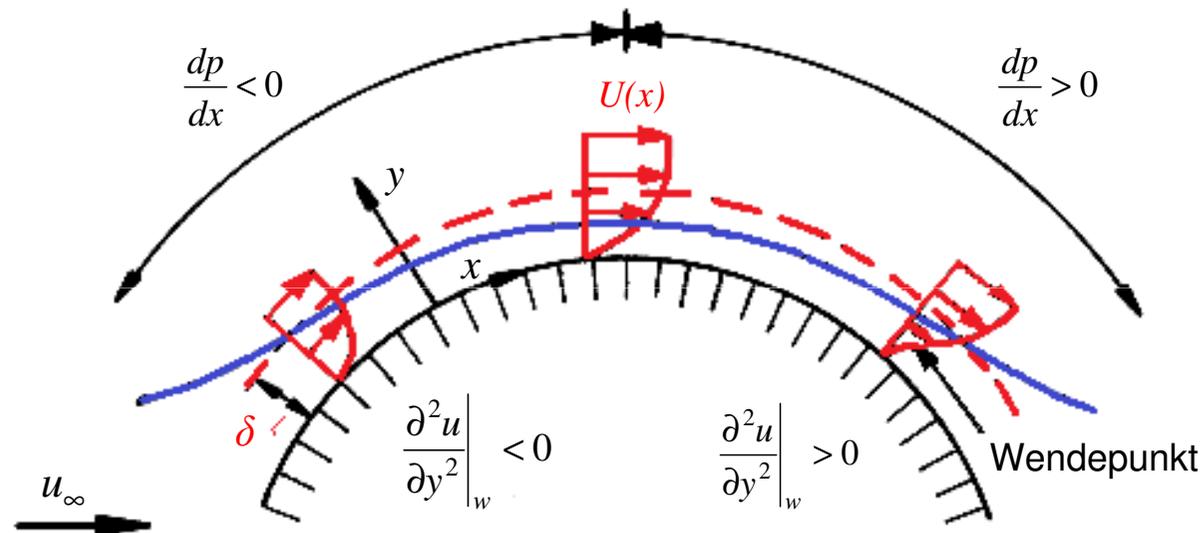


Grenzschichtablösung

Einfluss des Druckgradienten

ebene Platte : $\frac{dp}{dx} = 0$

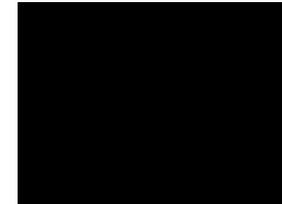
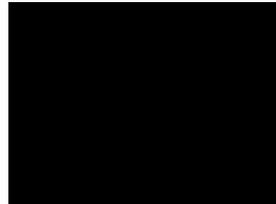
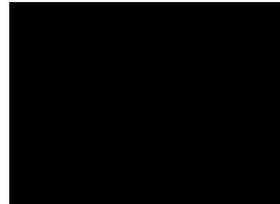


Auswirkungen von $\frac{dp}{dx}$ auf $u(y)$?

Grenzschichtgleichung (x-Impuls):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

Grenzschichtablösung



weiterhin :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} = -\rho U \frac{dU}{dx}$$

Wand $y = 0$: $u = v = 0$

$$\Rightarrow \frac{dp}{dx} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{dp}{dx} < 0 \text{ (beschleunigte Strömung)} : \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{\text{Wand}} < 0$$

nahe dem Grenzschichttrand δ gilt: $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$ mit

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=\delta} \rightarrow 0 \quad \text{folgt} \quad \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{y=\delta} < 0$$

\Rightarrow **kein** Vorzeichenwechsel von $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ in $0 \leq y \leq \delta$ (i. a.)

$$\frac{dp}{dx} > 0 \text{ (verzögerte Strömung)} : \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{\text{Wand}} > 0$$

\Rightarrow Vorzeichenwechsel zwischen $0 \leq y \leq \delta$

\rightarrow $u(y)$ hat Wendepunkt, in dem $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$

Bemerkung: ebene Platte : $\left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{y=0} = 0$

$\frac{dp}{dx} > 0 \Rightarrow \delta(x)$ wächst deutlich an, denn $v(x, y) = -\int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy$

$-\frac{\partial u}{\partial x} \uparrow \Rightarrow v \uparrow \Rightarrow \delta \uparrow$

Mit $\frac{dp}{dx} > 0$ ist i. a. die **Ablösung der Strömung** verbunden.

Ablösung

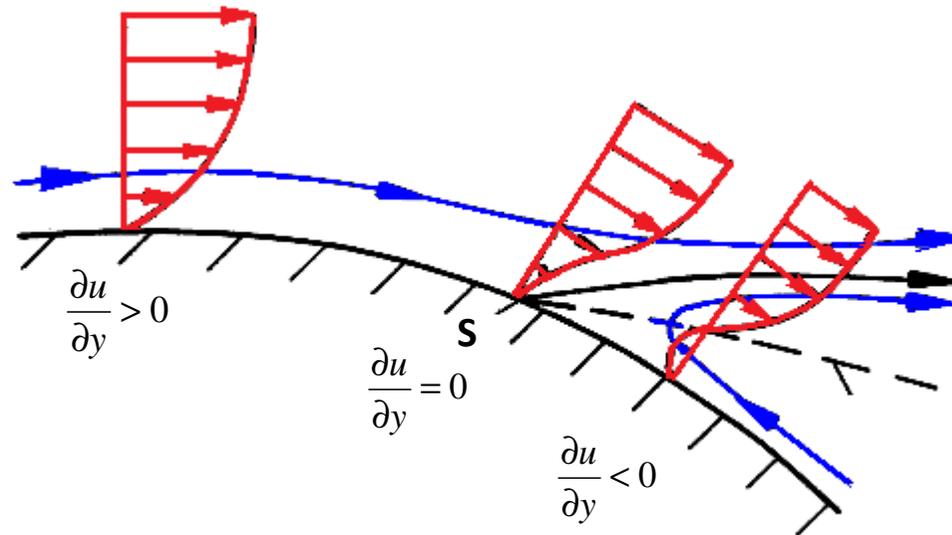
$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad \text{in} \quad 0 \leq y \leq \delta$$

$$\Rightarrow \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{y=y_w + \varepsilon} < 0 \quad \text{aufgrund von} \quad \frac{dp}{dx} > 0$$

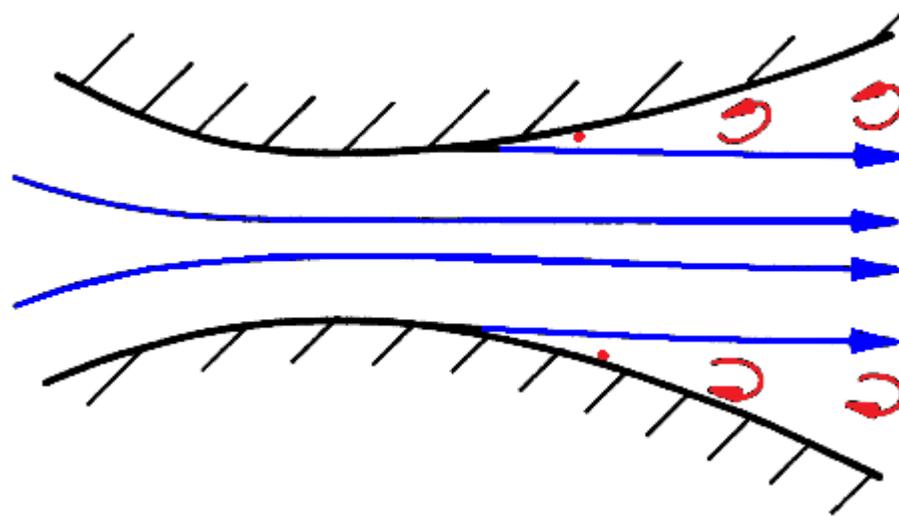
sofern $\frac{dp}{dx} > 0$ groß, folgt: $u_1(x_1, y_w + \varepsilon) > 0$, $u_2(x_1 + \varepsilon, y_w + \varepsilon) < 0$

→ Strömungsablösung

Ablösepunkt: $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{Wand}} = 0$



Ablösung bei externen und internen Strömungen



Die Grenzschichtgleichungen sind bis $x = x_s$ gültig ; für $x > x_s$ Grenzschichtannahmen im allgemeinen ungültig.

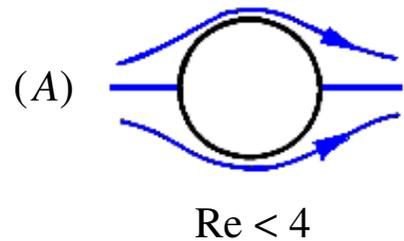
Strömung über einen Kreiszyylinder

Ablösung = $f(Re)$ vor allem bei **stumpfen** Körpern

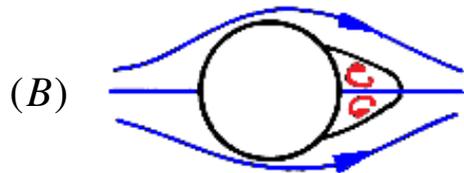
Analyse für den Kreiszyylinder :

$$\text{Re} = \frac{Ud\rho}{\eta}$$

$\text{Re} < 4$: $c_D \sim \text{Re}^{-1}$, keine Ablösung

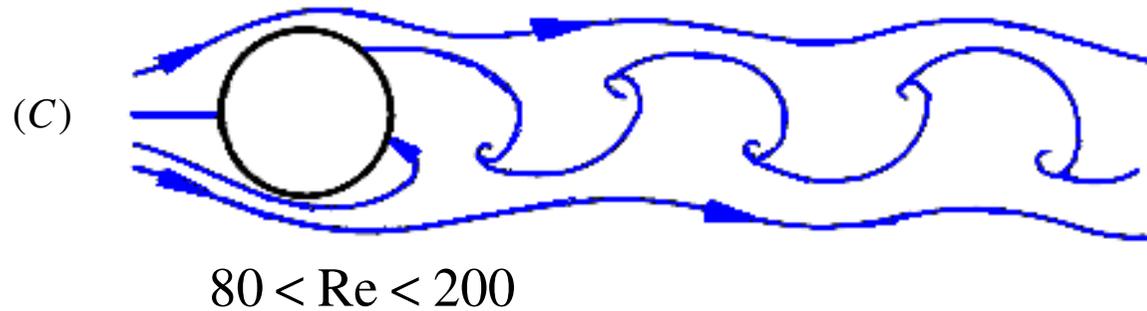


$4 < \text{Re} < 40$: Bildung zweier anliegender Wirbel



für $\text{Re} > 40$: Nachlauf wird instabil; Geschwindigkeit ist periodisch in t und in x (für $x > x_S$)

$80 < Re < 200$: 2 versetzte Wirbel im Nachlauf



→ von Kármánsche Wirbelstraße

$$u_{vor,ab} < U$$

$40 < Re < 80$: anliegende Wirbel nicht Teil der Wirbelstraße.

$Re > 80$: Wirbel \Rightarrow Oszillation des Zylinders.

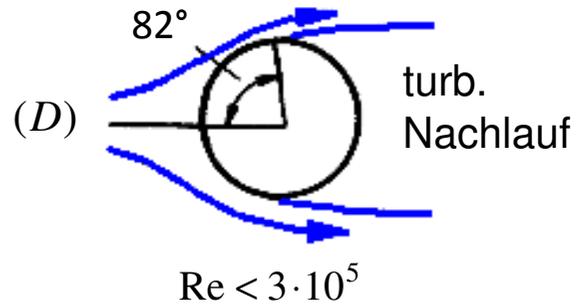
Strouhal Zahl : $St = f \frac{d}{U}$

dimensionslose Frequenz der abgehenden Wirbel :

$$St = 0.21 \quad (\text{Experiment, Numerik})$$

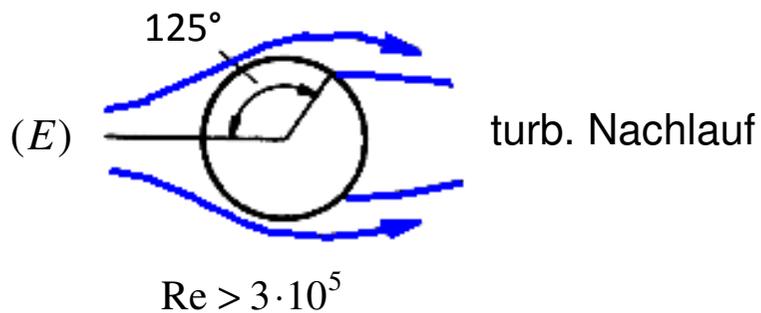
d klein, U klein $\rightarrow f$ im hörbaren Bereich

$Re < 3 \times 10^5$: Ablösung bei $\approx 82^\circ$, Grenzschicht ist laminar



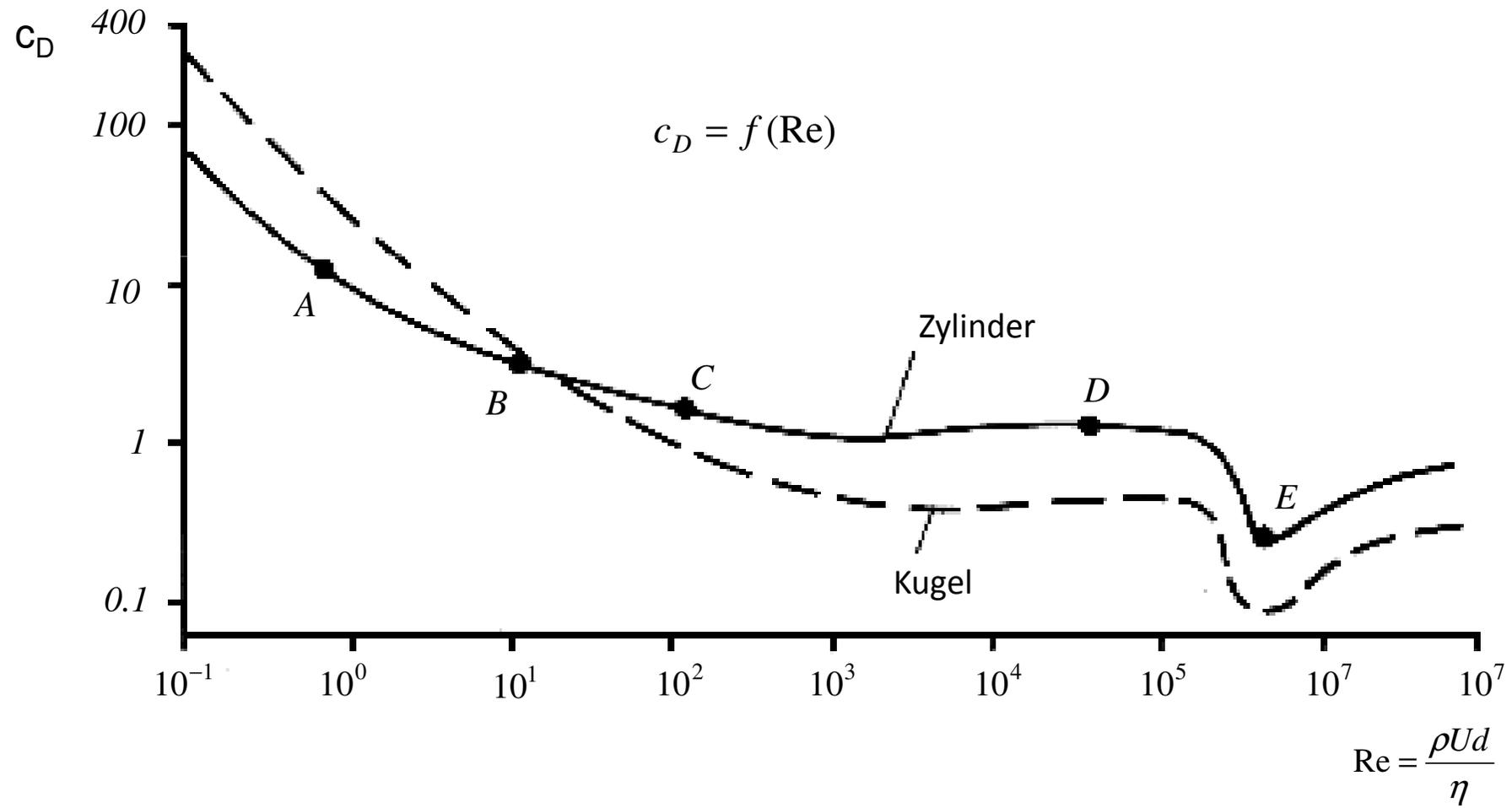
im Nachlauf : $p \approx konst. < p_\infty$

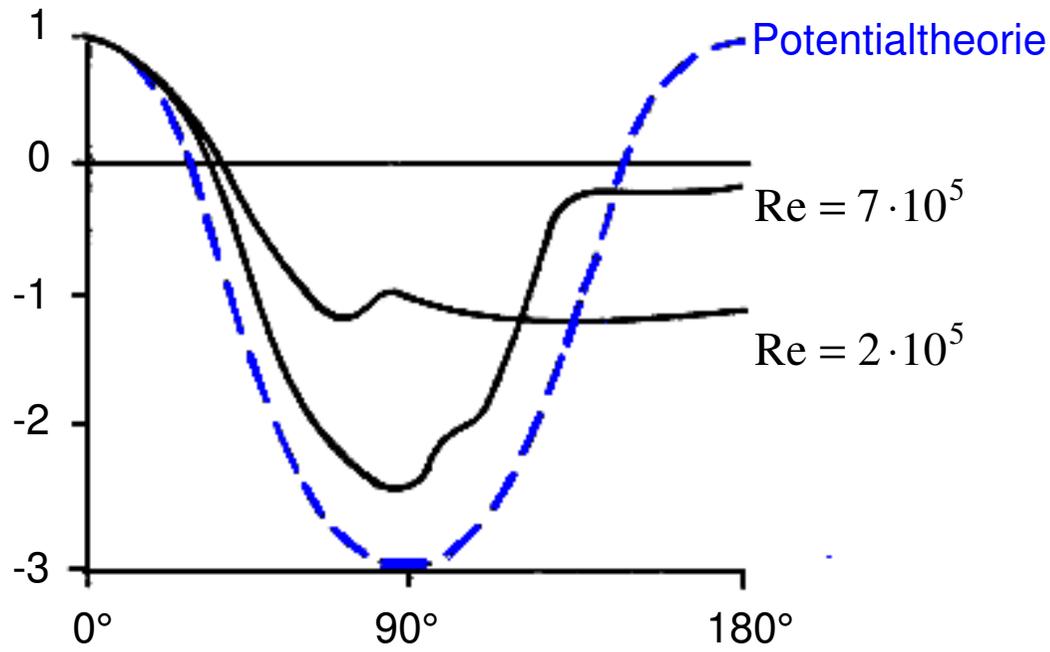
$3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$: Grenzschicht ist turbulent, Ablösung bei $\approx 125^\circ$
 \Rightarrow Nachlauf wird schmaler



$Re > 3 \times 10^6$: $\Theta_s < 125^\circ$
 $\Rightarrow c_D$ steigt

$Re_{krit} = f(\text{Turb. in der Anströmung, Oberflächenrauigkeit})$





$$c_p = f(\Theta), \text{Zylinder}$$

Strömung über eine Kugel

Übergang 2D → 3D → deutliche Unterschiede

z. B. : keine reguläre Wirbelströmung

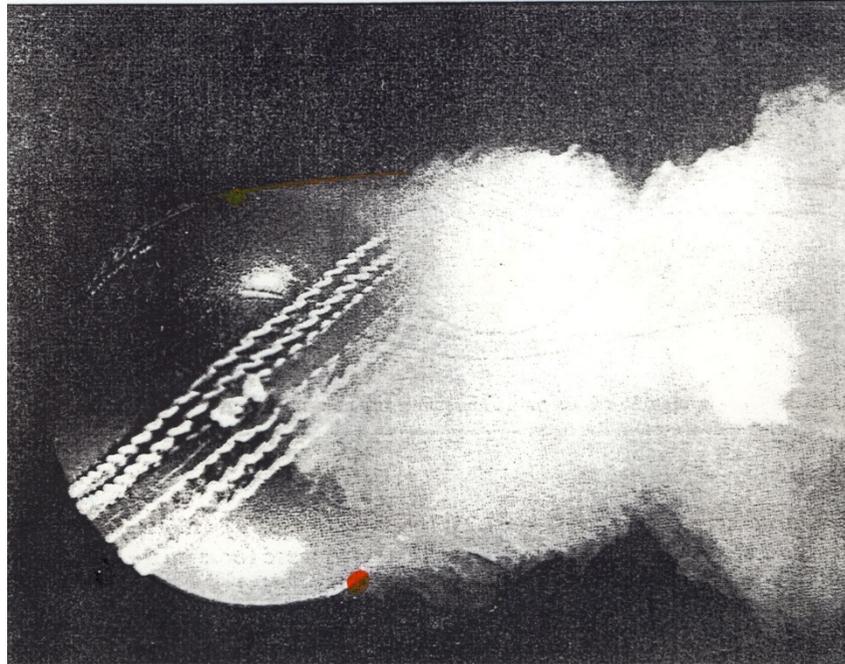
$Re < 130$: anliegender Wirbelring

$Re > 130$: Oszillationen beginnen, verzernte Wirbelschleifen gehen ab

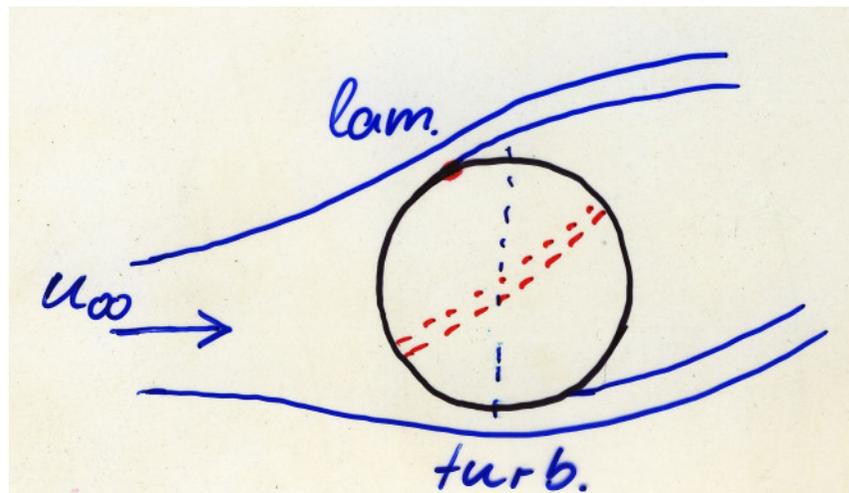
Verhalten der Grenzschicht wie beim Kreiszyylinder ;

$$Re_{krit} \approx 5 \times 10^5 \quad (\text{Kugel})$$

Transition laminar – turbulent $\Rightarrow c_D$ sinkt



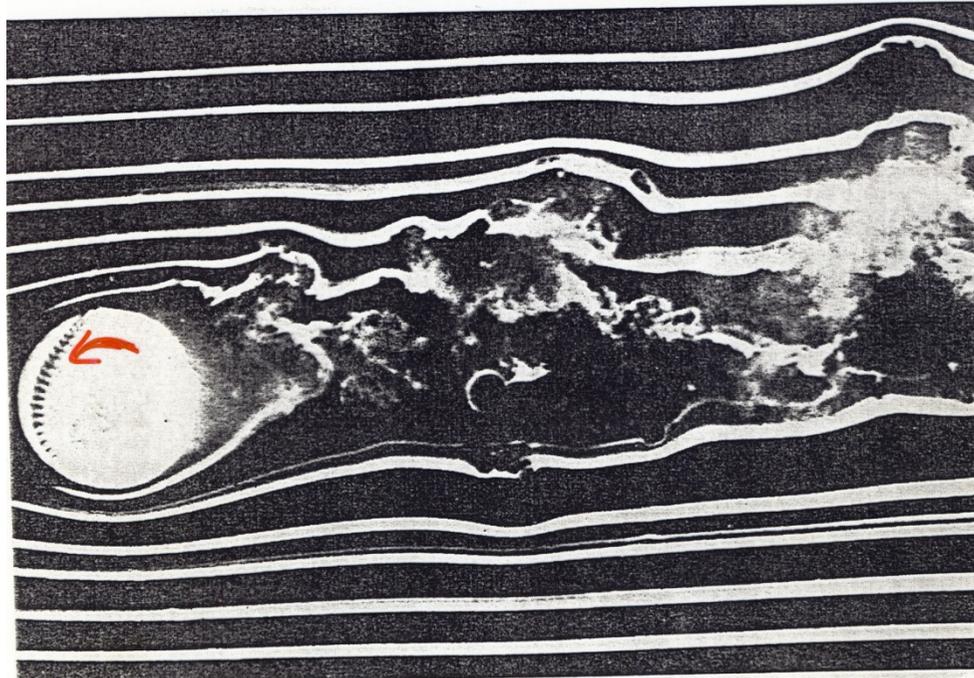
Strömung über einen Cricketball ;



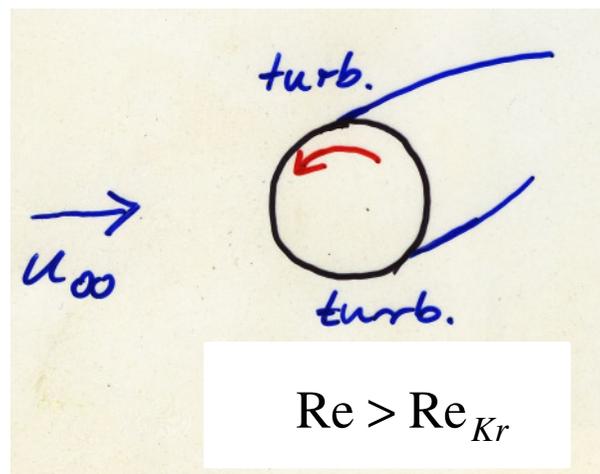
$$Re \approx 10^5$$



Richtung der
Seitenkr.



Strömung über einen rotierenden Baseball ,



↓
Richtung der
Seitenkr.