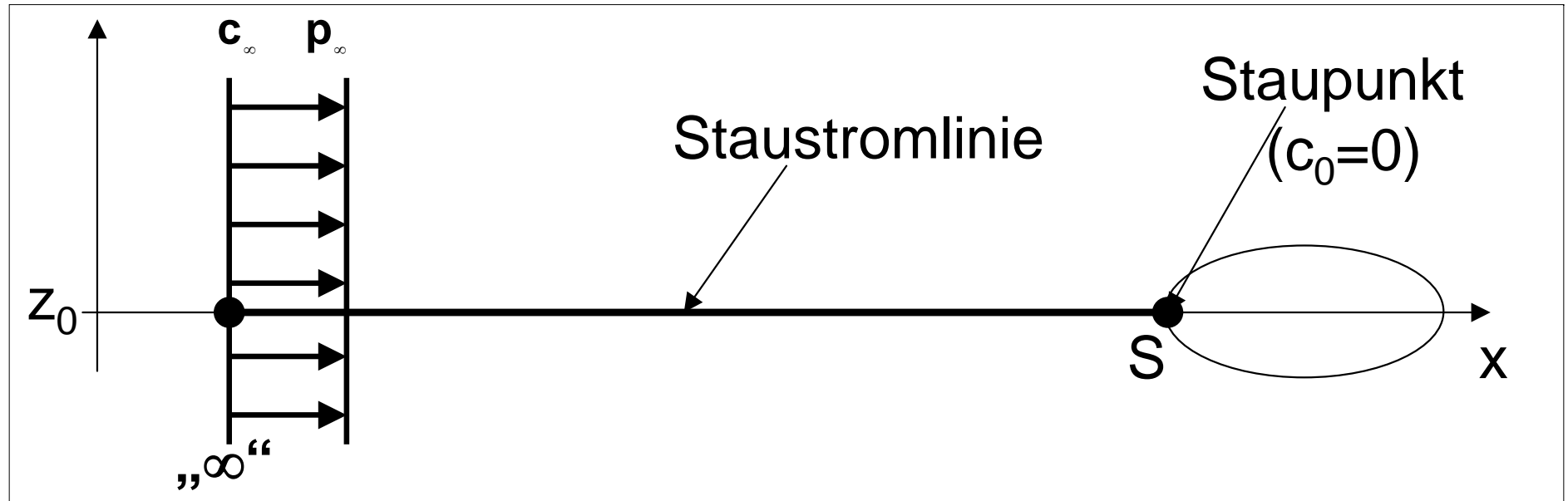


# Wiederholung

## 3.4 Die verschiedenen Druckbegriffe und ihre Messung



$$\frac{\rho}{2} \cdot c_\infty^2 + p_\infty = p_0$$

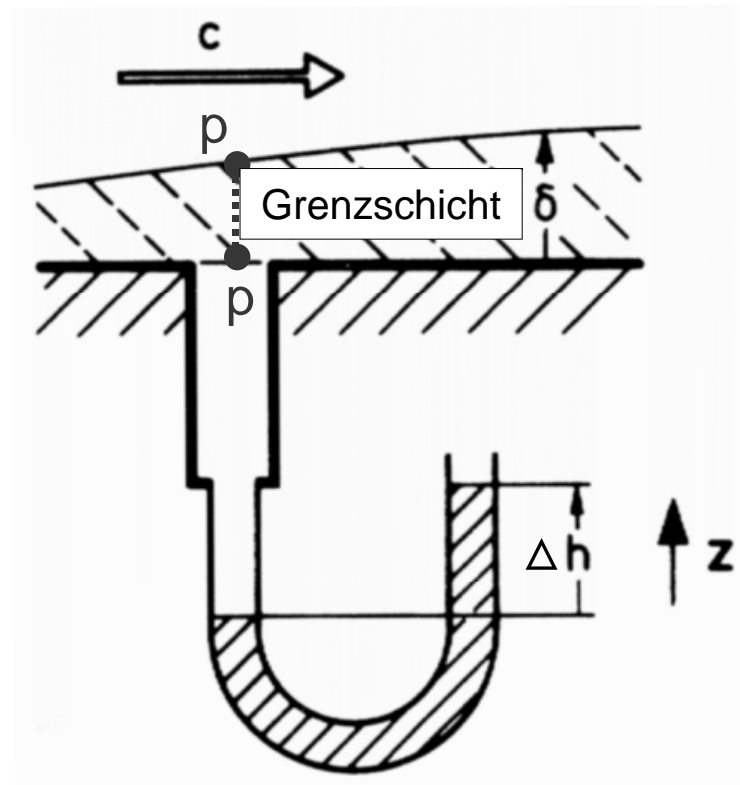
Dynamischer Druck + statischer Druck = Ruhe-/Gesamtdruck

# Wiederholung

## Wandanbohrung:

Dynamischer Druck + statischer Druck = Ruhe-/Gesamtdruck

Messung des statischen Druckes senkrecht zur Strömungsrichtung



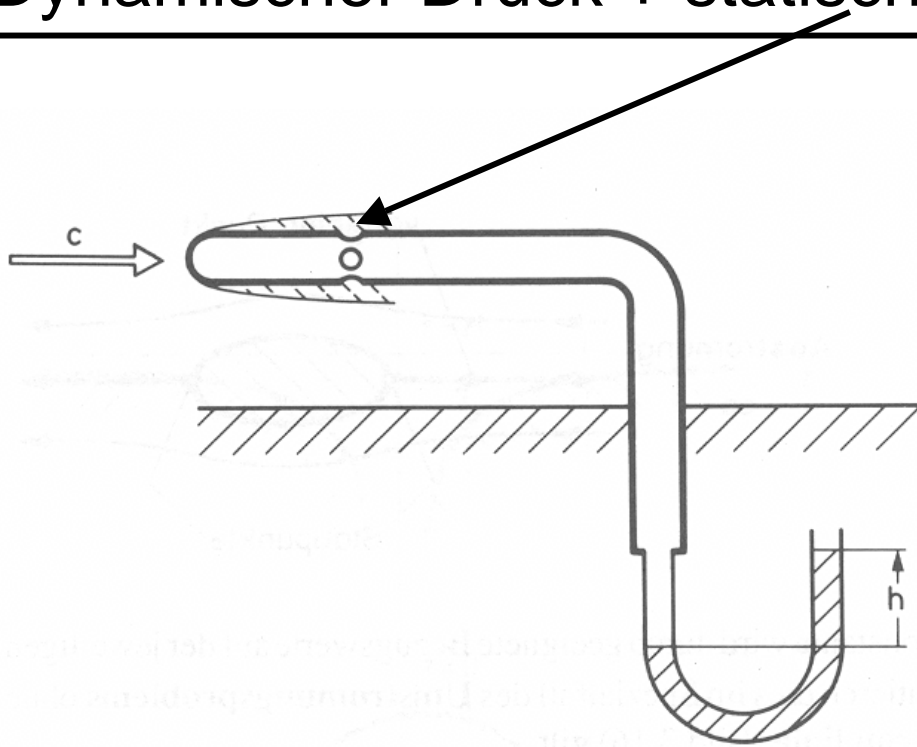
Über die Höhe der Grenzschicht ( $\delta$ ) ist der statische Druck konstant

Messung des Druckes in Aussenströmung, auch bei Reibung!

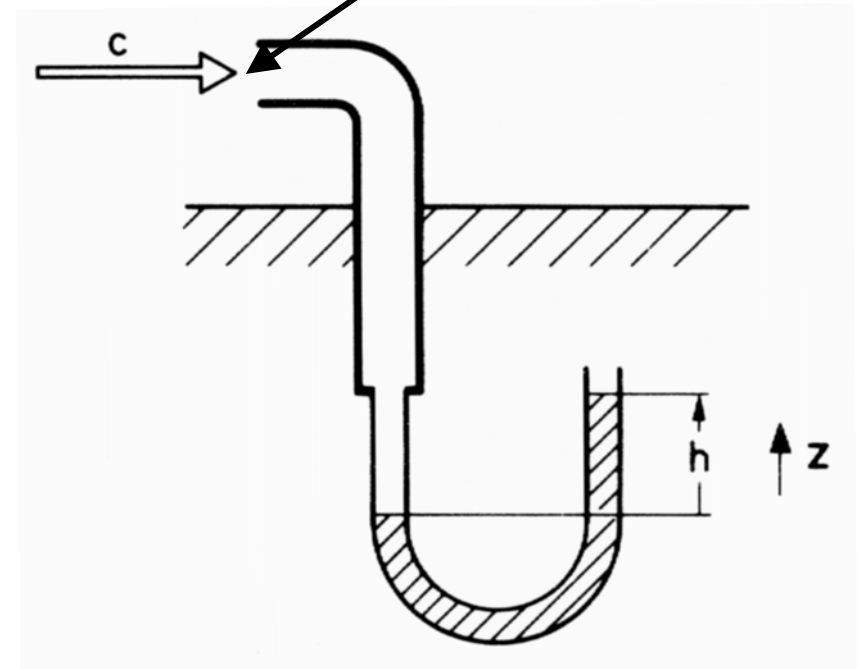
# Wiederholung

## Drucksonden:

Dynamischer Druck + statischer Druck = Ruhe-/Gesamtdruck



Statische  
Drucksonde



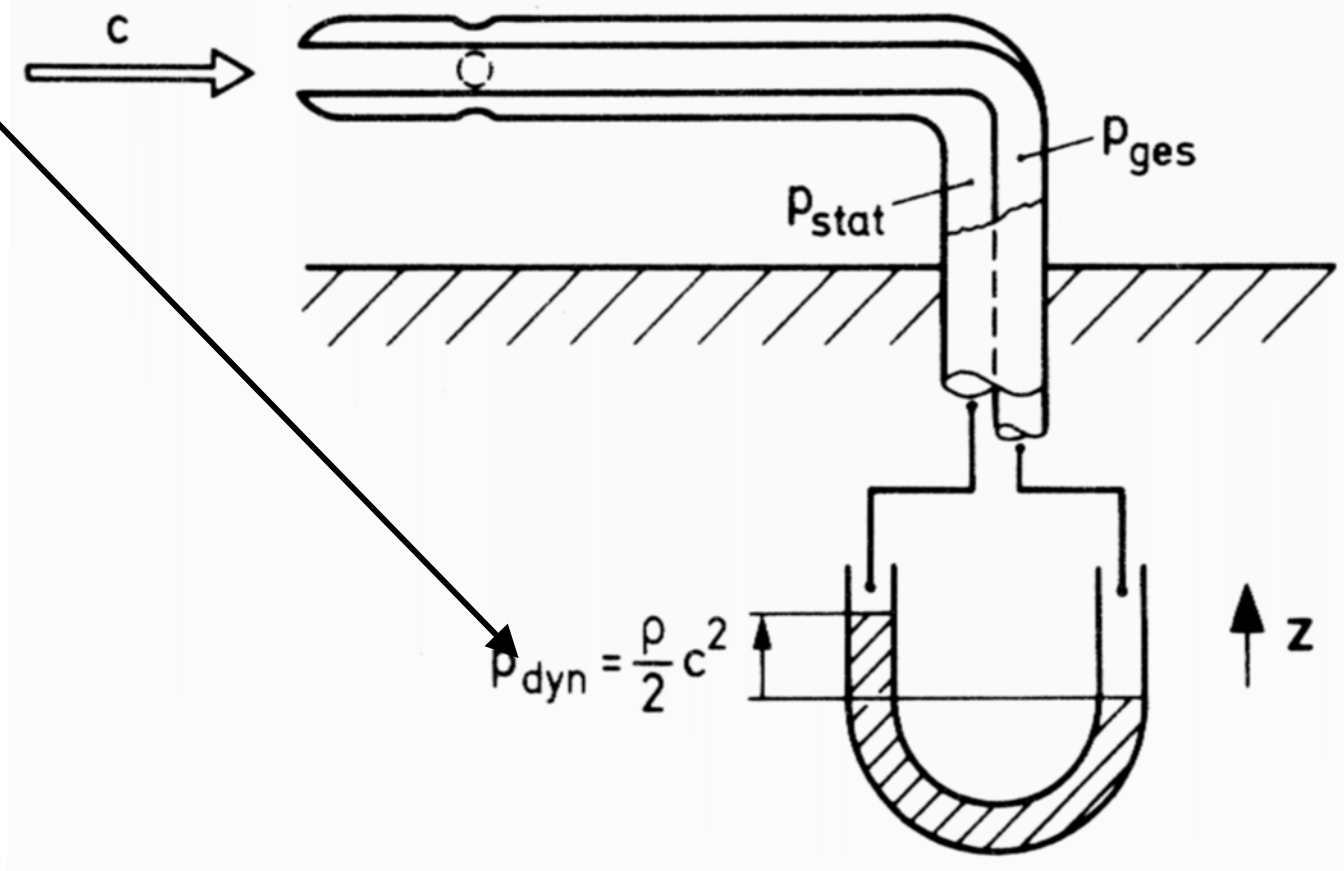
PITOT-Rohr  
(Hakensonde)



# Wiederholung

## Drucksonden:

Dynamischer Druck + statischer Druck = Ruhe-/Gesamtdruck



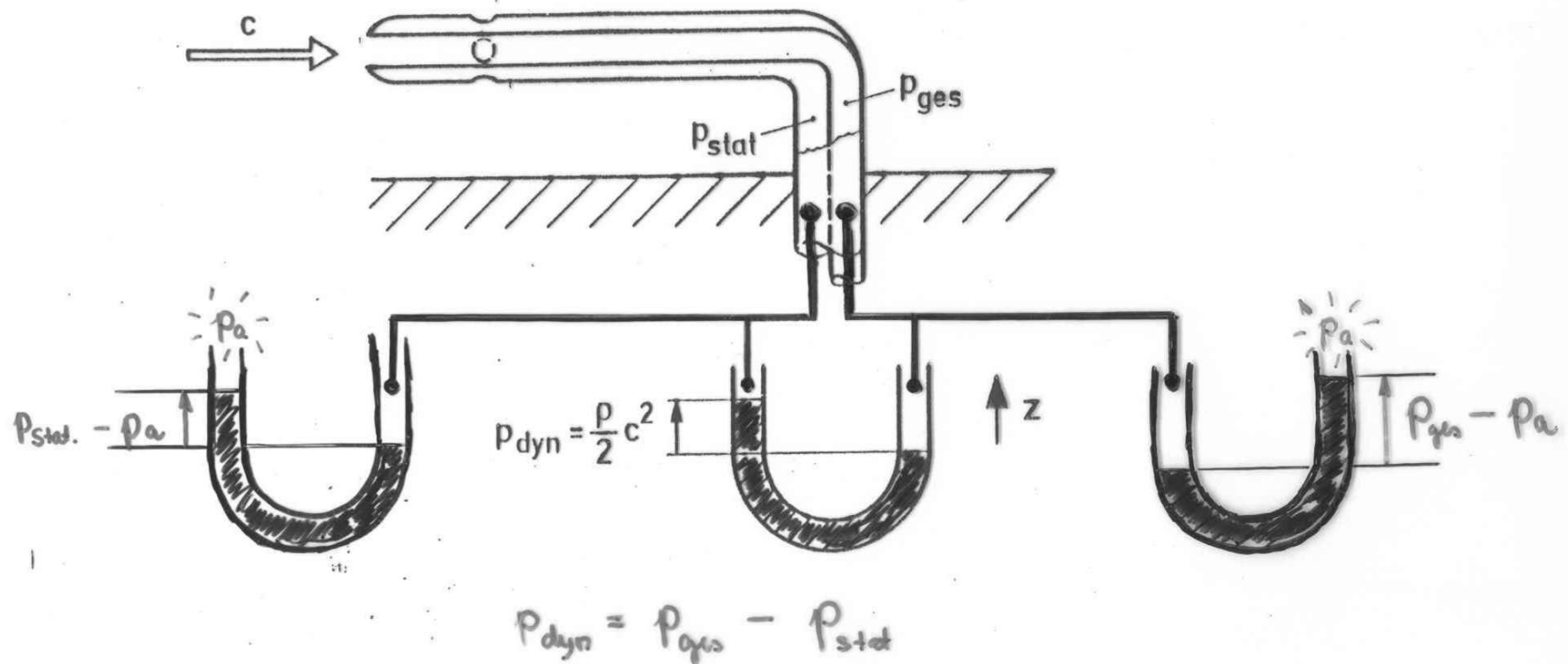
## PRANDTL-Sonde

Institut für Fluid- und Thermodynamik  
Universität Siegen



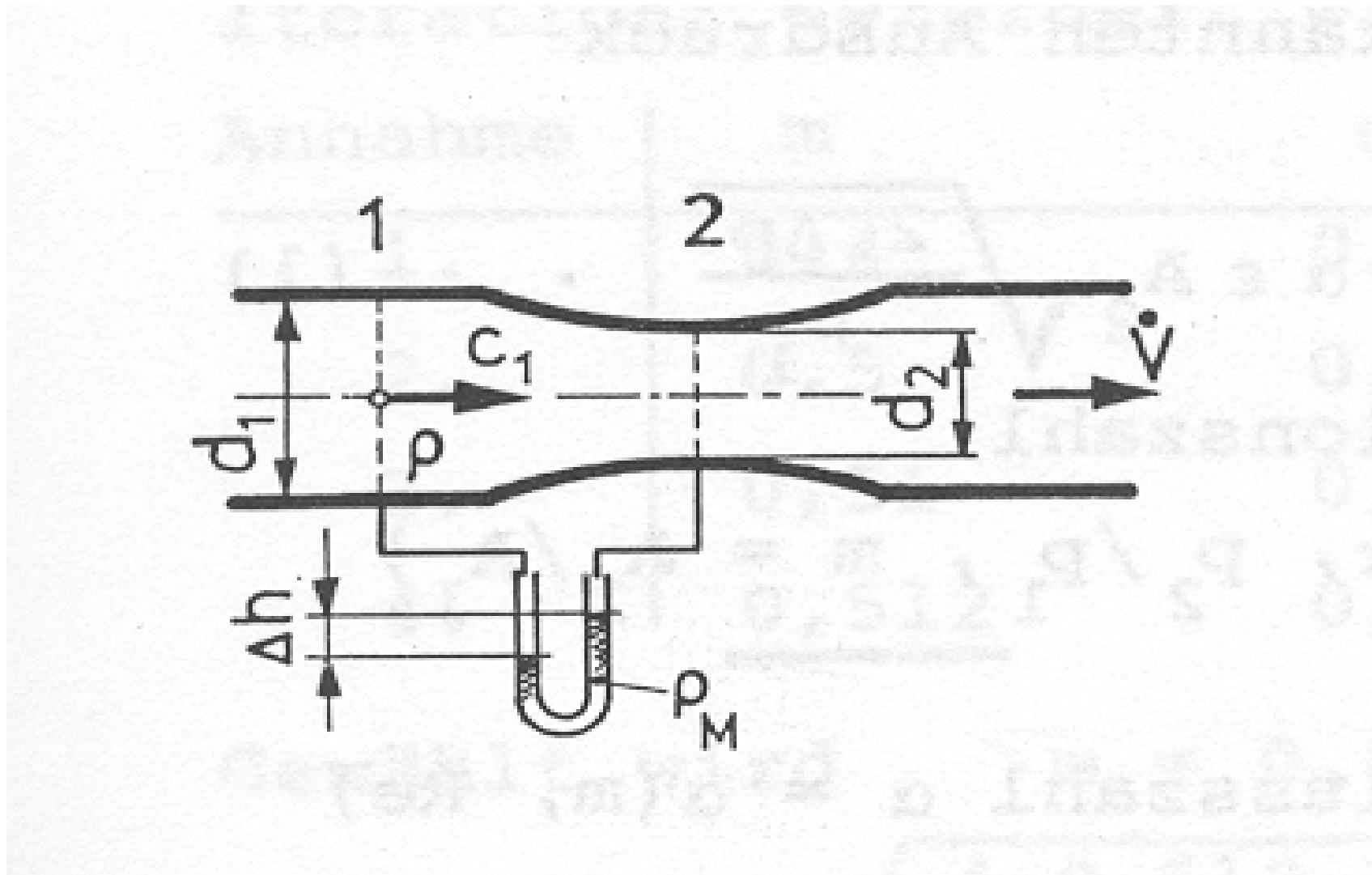
# Wiederholung

## Beispiel: Staubsauger und -gebläse



## PRANDTL-Sonde

# Durchflußmessung mittels VENTURI-Rohr



### 3.5 Ausströmen von Flüssigkeiten und Gasen aus Gefäßen

a) inkompressibel:  $\rho = \text{konst.}$  (Flüssigkeit)

- großes Reservoir, großer Behälter:  $c_1 \approx 0$
- aus Bernoulli-Gleichung:

$$c_2 = \sqrt{2 \left( \frac{p_1 - p_2}{\rho} + g(z_1 - z_2) \right)} = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho} + 2gh}$$

Spezialfälle:

2. Ausströmen infolge Überdruck (horizontal,  $z_1 = z_2$ )

Wegen  $\rho = \text{konst.}$  nur für Gas bei kleiner Geschwindigkeit ( $c_2 < 70 \text{ m/s}$ )

$$c_2 = \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

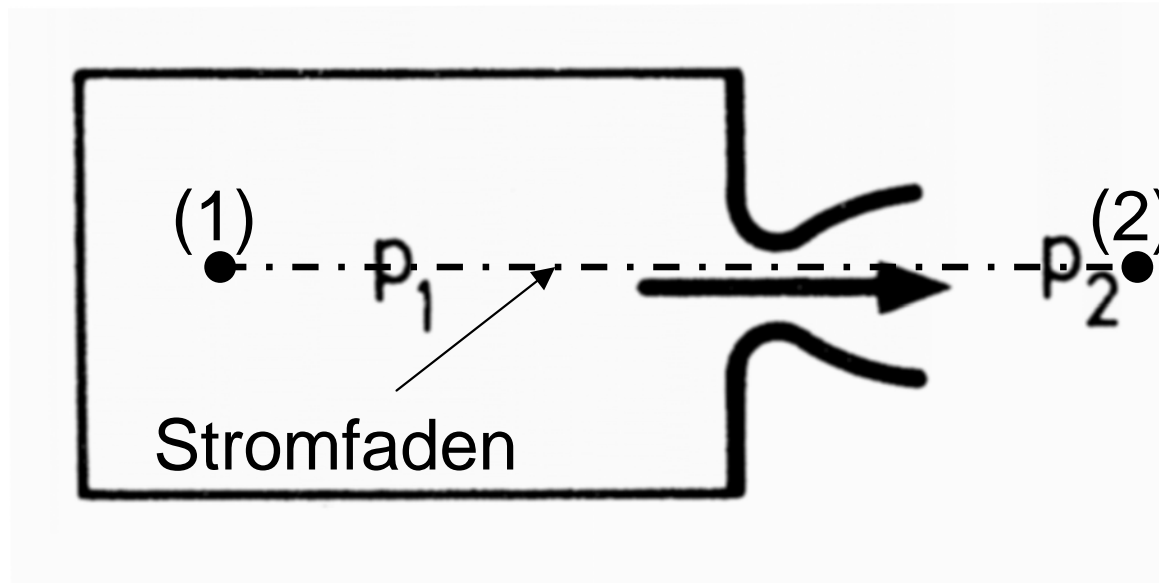
Druckenergie  $\Delta p$  vollständig in kinetische Energie  $\rho c^2/2$  umgewandelt.



# Ausströmen infolge Überdruck

--- inkompressibel:  $\rho = \text{konst.}$  (Flüssigkeit)

--- horizontales Ausströmen:  $z_1 = z_2$ :  $h = 0$



$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}$$

Großer Behälter (Kessel):

$$c_1 \approx 0$$





## Geschwindigkeit infolge Überdruck

--- inkompressibel:  $\rho = \text{konst.}$  (Flüssigkeit)

--- horizontales Strömen:  $z_1 = z_2$ :  $h = 0$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}}$$

### **Beispiel: Windbewegung in der Atmosphäre**

Druckdifferenz:  $\Delta p = 10 \text{ mbar} = 10^3 \text{ Pa}$

Atmosphärendruck:  $p_a = 1013 \text{ mbar} \approx 10^5 \text{ Pa}$

$$\Rightarrow \frac{\Delta p}{p_a} \approx 1\%$$

Dichte der Luft:  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

$$\Rightarrow c_2 \approx 40 \text{ m/s} \approx 145 \text{ km/h}$$

**Orkan!**



b) kompressibel:  $\rho = \rho(p, T)$

GASDYNAMIK

--- muß berücksichtigt werden, wenn größere Druckdifferenzen wirksam sind

--- generell kann bei kompressiblen Strömungen der Einfluß der Schwerkraft vernachlässigt werden, wenn nicht zu große Höhendifferenzen auftreten!

Bernoulli-Gleichung, kompressibel, nicht zu große Höhendifferenzen:

$$\frac{c^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} + \underset{=0}{g \cdot z} = \text{konst.}$$



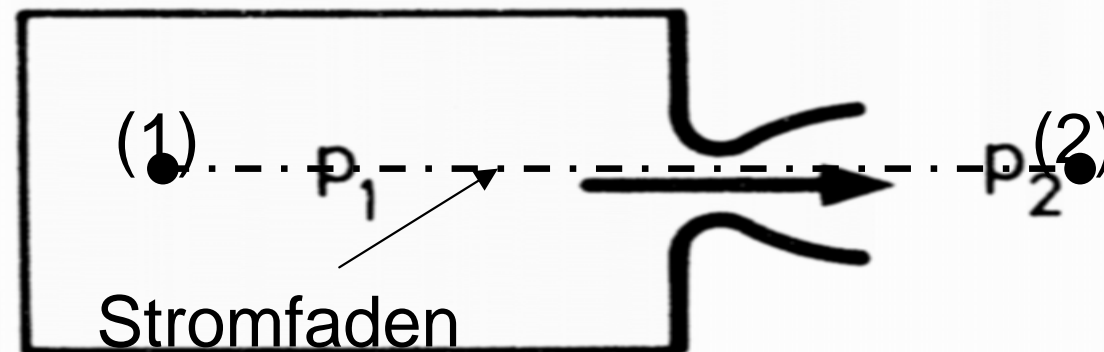
b) kompRESSibel:  $\rho = \rho(p, T)$  ; isentrope Zustandsänderung

--- aus Vorlesung:

$$\Rightarrow \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = \frac{\kappa}{\kappa-1} \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right)$$

--- Bernoulli Glg.

$$\frac{c_2^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \cancel{\frac{c_1^2}{2}} \Rightarrow \frac{c_2^2}{2} = - \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$



b) kompressibel:  $\rho = \rho(p, T)$  ; isentrope Zustandsänderung

--- Ausflußformel nach St. Venant – Wantzell:

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left( 1 - \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right)}$$

--- Maximalgeschwindigkeit: wenn  $\frac{p_2}{p_1} \longrightarrow 0$

$$c_{2,\max} = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1}} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{R}{m} \cdot T_1}$$

**z.B. Luft unter Atmosphärenbedingungen:**

$$\kappa = 1.4, p_1 = 10^5 \text{ Pa}, \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

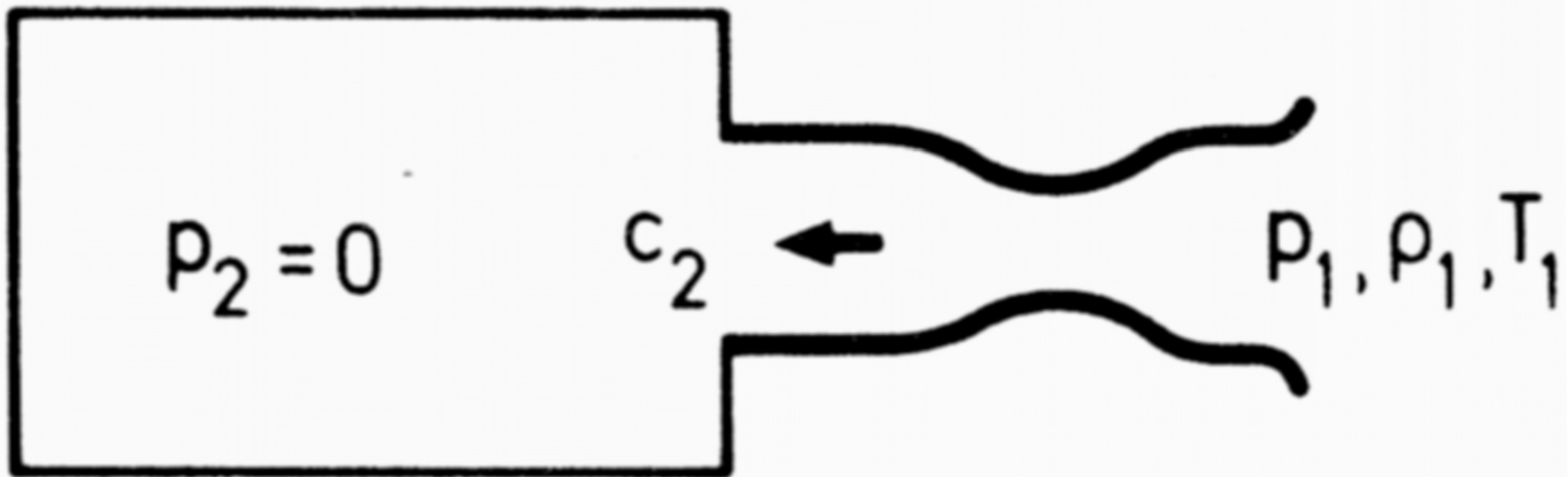
$$\Rightarrow c_{2,\max} = 750 \text{ m/s}$$



# Prinzip eines Überschall-Windkanales

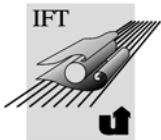
evakuieren

Intermittierender Betrieb

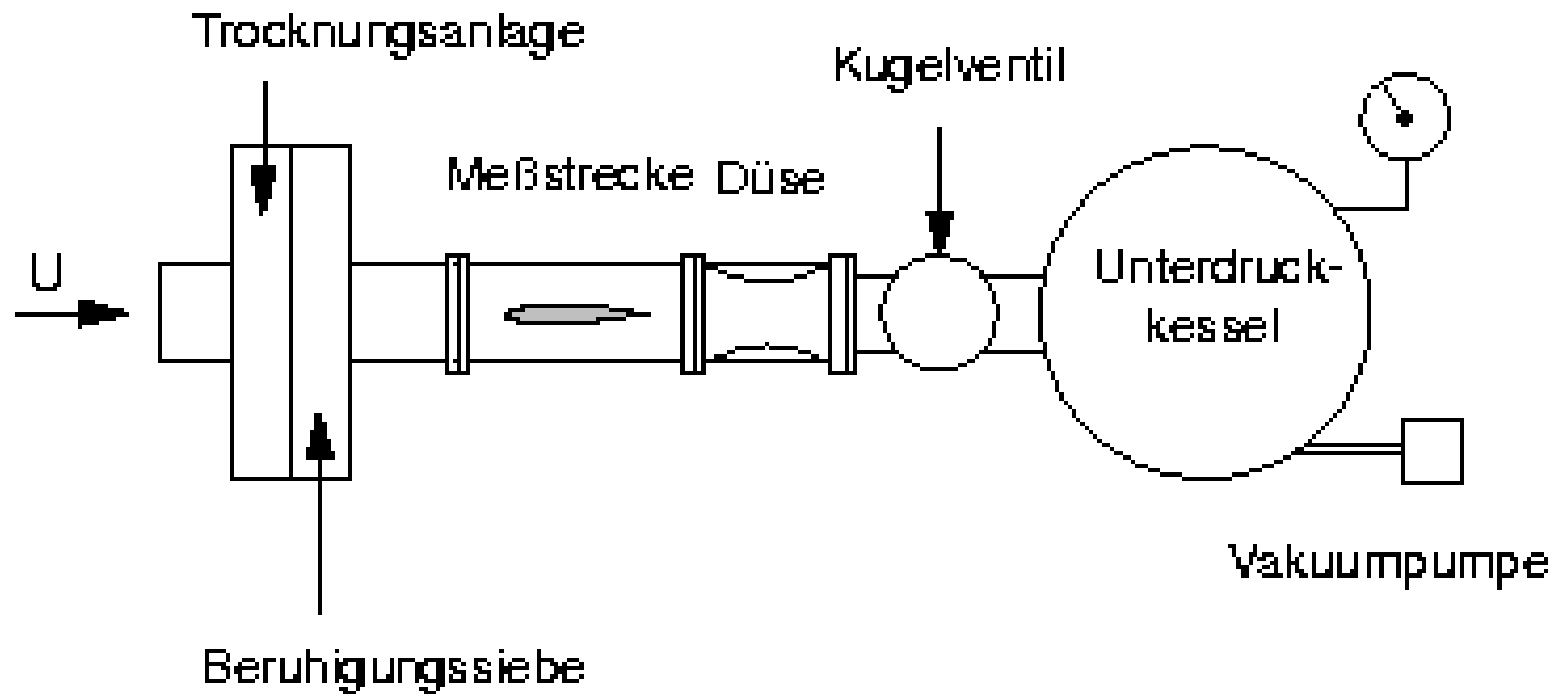


Vorteil: wenig Lärm; Nachteil: Feuchtegehalt der angesaugten Luft wechselt  $\longrightarrow$  Silikageltrocknung

$c_2 \longrightarrow c_{2,\max}$

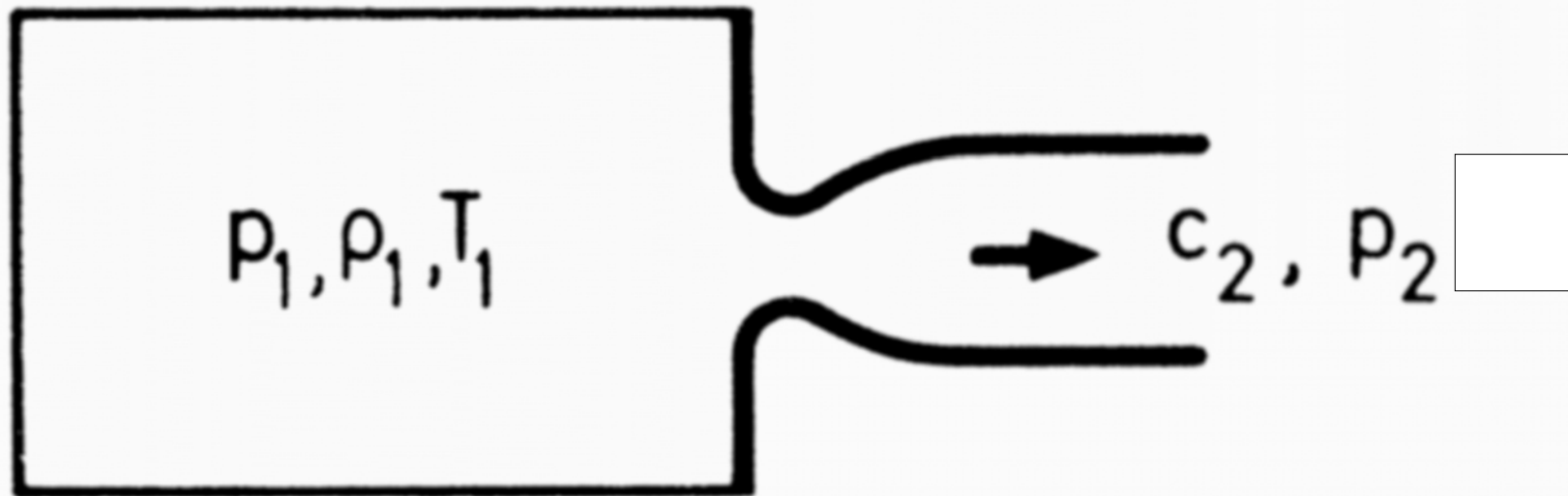


# Prinzip eines Überschall-Windkanales



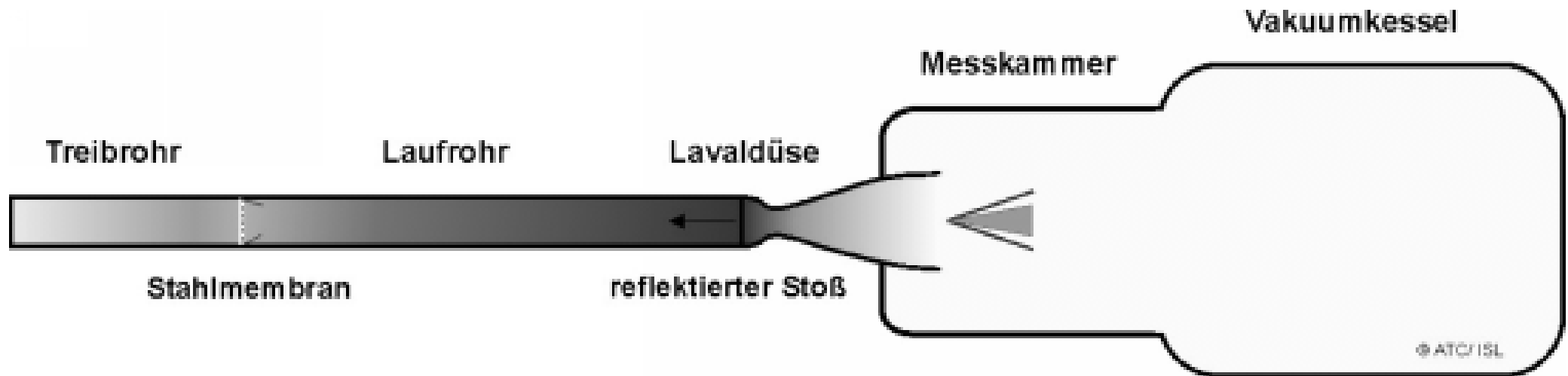
# Überschall-Windkanal nach „Blow-down“-Prinzip

aufladen



Nachteil: große Lärmentwicklung

# Stoßrohr (Hyperschall-Windkanal: $M > 5$ )





# Stoßrohr-Labor, ISL-St. Louis, Frankreich

