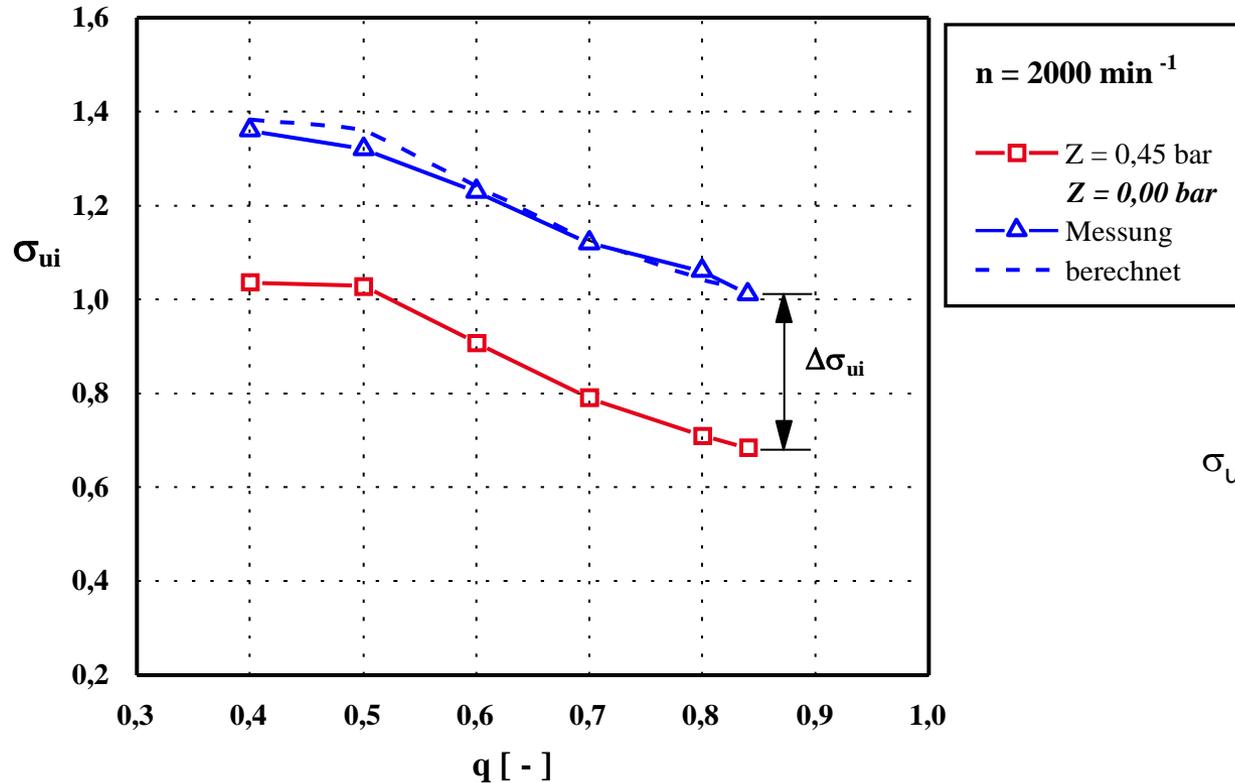


3.2.1.2 Zugfestigkeit (4)



$$\sigma_{u,i} = \frac{p_{\text{tot},0} - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{1,a}^2}$$

$$\sigma'_{u,i} = (\sigma_{u,i})_{\text{ber.}} = \frac{p_{\text{tot},0} - p_{\text{krit}}}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{1,a}^2} = \frac{p_{\text{tot},0} - (p_v - p_{\text{ts}})}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{1,a}^2} = \sigma_{u,i} + \Delta\sigma_{u,i}$$

3.2.2 Art der Feststellung



Visuell:

a.) optische Zugänglichkeit

- b.) Empfindlichkeit:
- $R_{\max} \geq R_{\text{Gr,vis}}$
 - Ereignis-Häufigkeit
(da ja stochastischer Vorgang)

Akustisch:

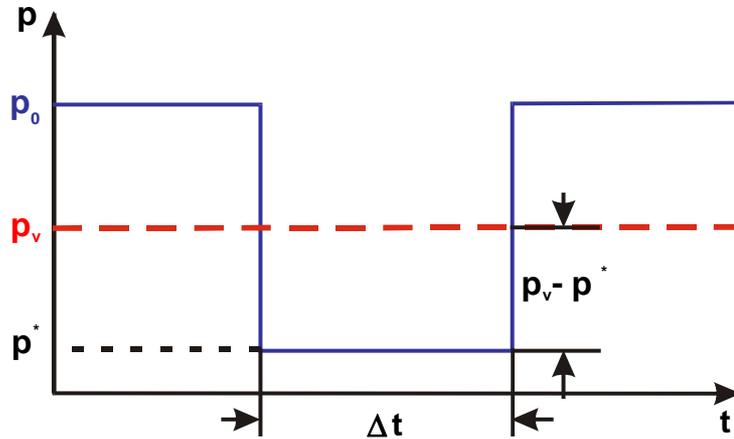
a.) akustische Zugänglichkeit

- b.) Empfindlichkeit:
- Aufnahmeart und -ort
 - Frequenzbereich
 - Störgeräusche
 - $R_{\max} \geq R_{\text{Gr,ak}}$
 - Ereignis-Häufigkeit
(da ja stochastischer Vorgang)

Bedingung für $R_{\max} \geq R_{\text{Gr,x}}$:

- $p^* \leq p_{\text{krit}}$
- $\Delta t \geq \Delta t_{\min}(p_v - p^*, R_{\text{Gr}})$

3.2.3 “Wirkdauer“ Δt von p_i



Nach der Blasendynamik:

$$R_{\max} \approx \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_v - p^*}{\rho}} \cdot \Delta t$$

Für $R_{\max} = R_{Gr}$:

$$\Delta t_{\min} \sim \frac{R_{Gr}}{\sqrt{p_v - p^*}}$$

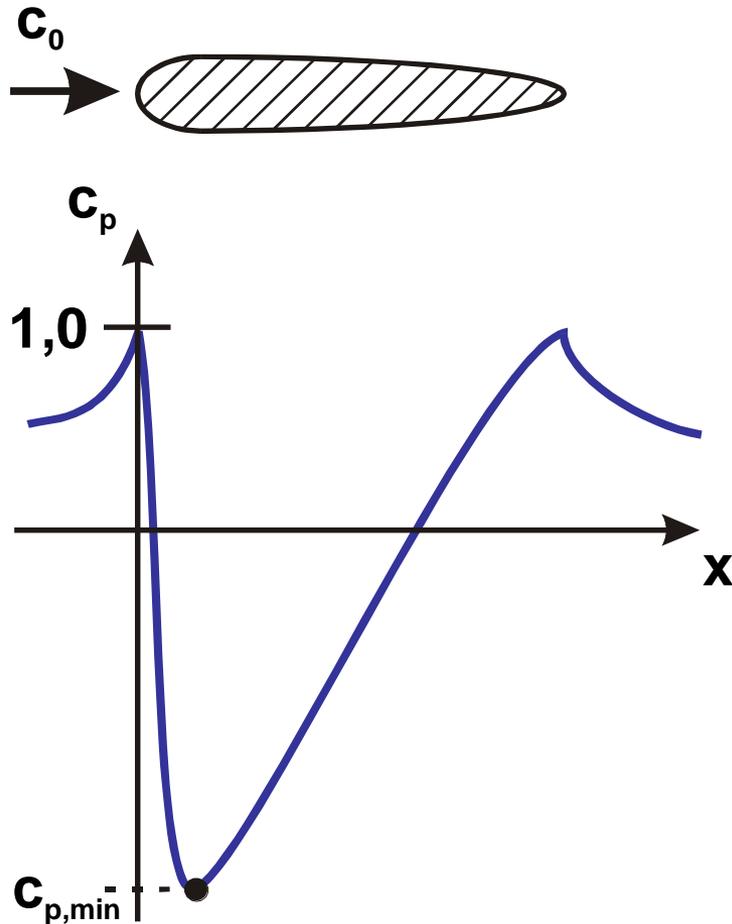
bzw.

$$(p_v - p^*)_{\min} = p_v - p_i \sim \frac{R_{Gr}^2}{\Delta t^2}$$

Hinweis:

$$R_{Gr,vis}/R_{Gr,ak} \approx 5 \div 10$$

3.2.4.1 Potentialtheoretische Druckverteilung



Dimensionsloser Druckbeiwert

$$c_p = \frac{p_x - p_0}{\frac{\rho}{2} c_0^2}$$

Für $c_{p,min}$ gilt:

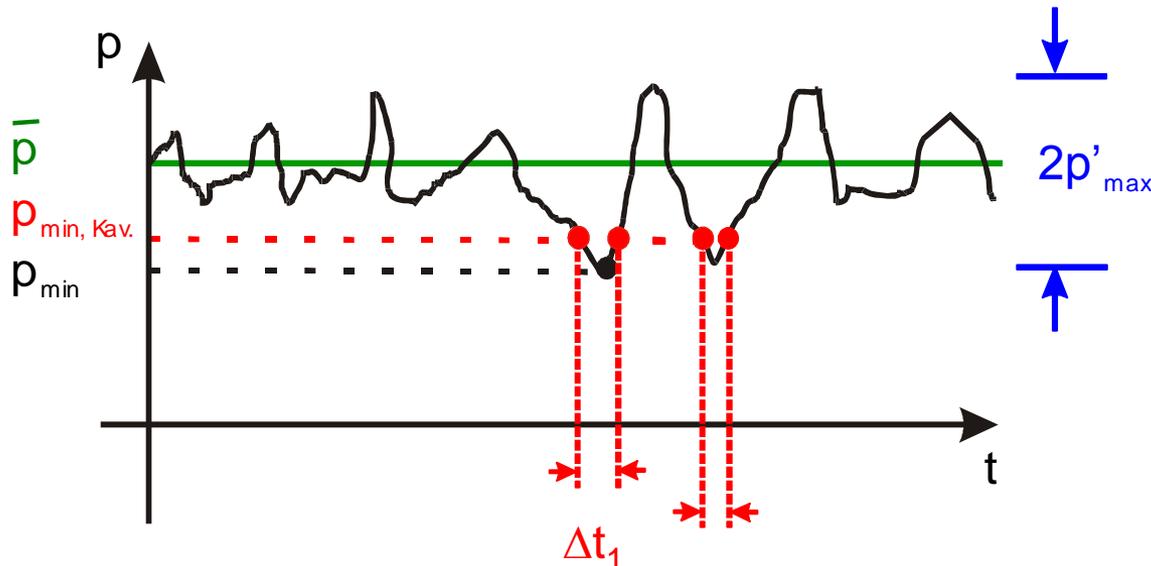
$$(p_x)_{c_{p,min}} = (p_x)_{min} = p_{min}$$

3.2.4.2 Reibungseffekte (1) - Turbulenz

$$c(\vec{r}, t) = \underbrace{\bar{c}(\vec{r})}_{\text{zeitlicher Mittelwert}} + \underbrace{c'(\vec{r}, t)}_{\text{Schwankungsbewegung}}$$

$$\Rightarrow p(\vec{r}, t) = \bar{p}(\vec{r}) + p'(\vec{r}, t)$$

Frequenz der Schwankungen: 20 Hz ÷ 1 kHz



$$p'_{\text{eff}} = \sqrt{p'^2}$$

$$p'_{\text{max}} \approx 4 \cdot p'_{\text{eff}}$$

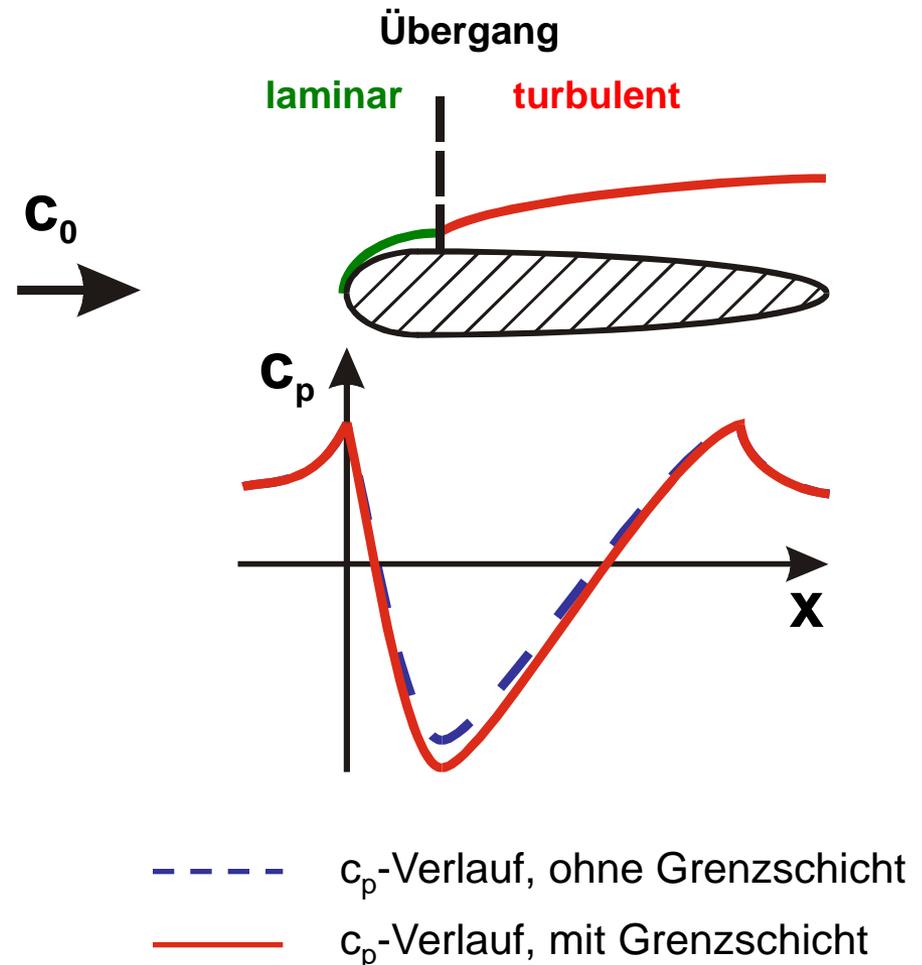
$$p_{\text{min}} = \bar{p} - p'_{\text{max}}$$

$$\Rightarrow p_{\text{min, Kav.}} \approx \bar{p} - (1,4 \div 1,9) p'_{\text{eff}}$$

3.2.4.2 Reibungseffekte (2) - turbulente Grenzschicht

Grenzschicht ohne Ablösung

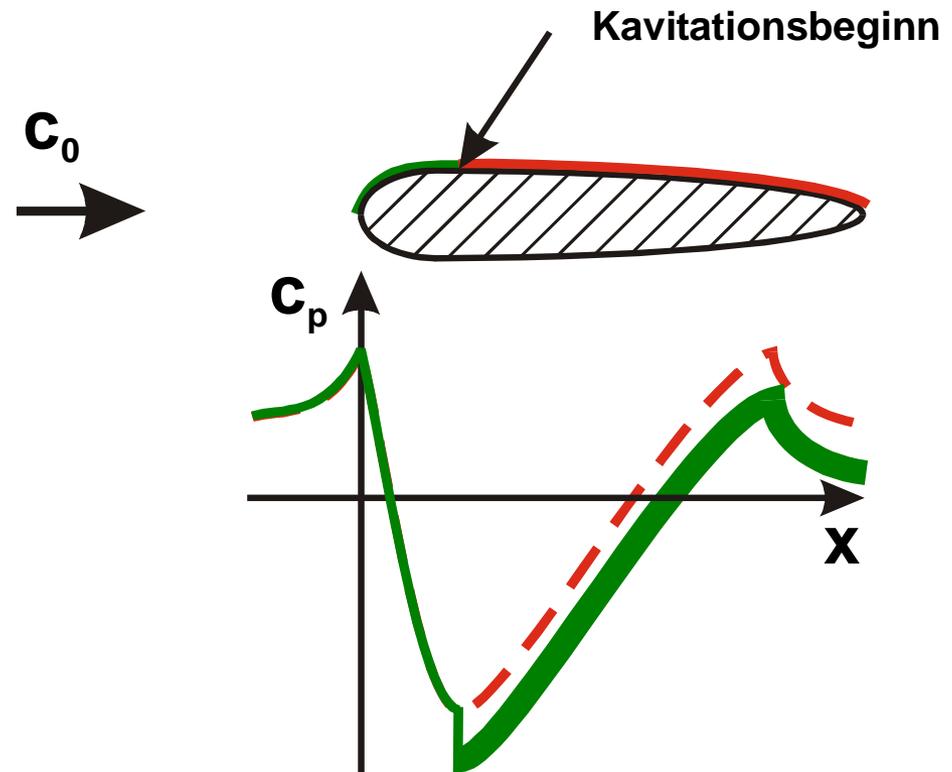
- laminare Grenzschicht
- Umschlag
- turbulente Grenzschicht



3.2.4.2 Reibungseffekte (3) - turbulente Grenzschicht

Ort des Kavitationsbeginns

Vorwiegend im Bereich des Umschlages (oder in der turbulenten Grenzschicht)



- - - c_p -Verlauf, ohne Kavitation
- c_p -Verlauf, mit Kavitation
- c_p -Band infolge Turbulenz

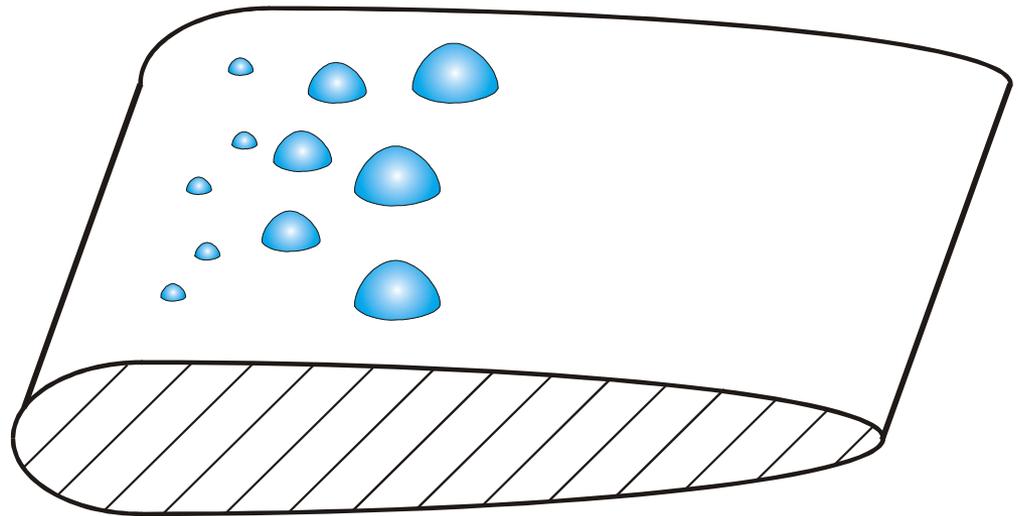
3.2.4.2 Reibungseffekte (4) - turbulente Grenzschicht

Typ der Kavitation

Einzelblasen

Einflussfaktoren

- Reynolds-Zahl (über Ort und Druck der Umschlagszone)
- Turbulenzgrad
- Keimgehalt



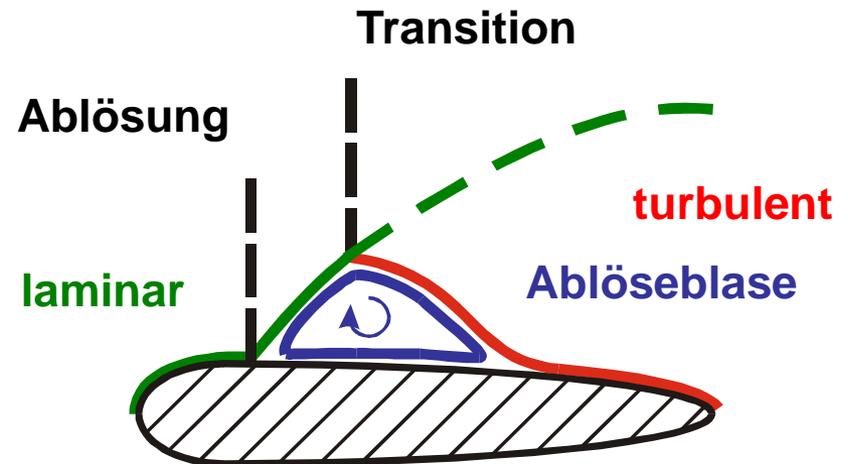
3.2.4.2 Reibungseffekte (5) - laminare Ablöseblase

Grenzschicht mit laminarer Ablöseblase

- laminare Grenzschicht
- Ablösung stromab vom Druckminimum
- Transition (Umschlag laminar - turbulent)
- Wiederaanlegen der turbulenten Grenzschicht

Ort des Kavitationsbeginns

In der Ablöseblase



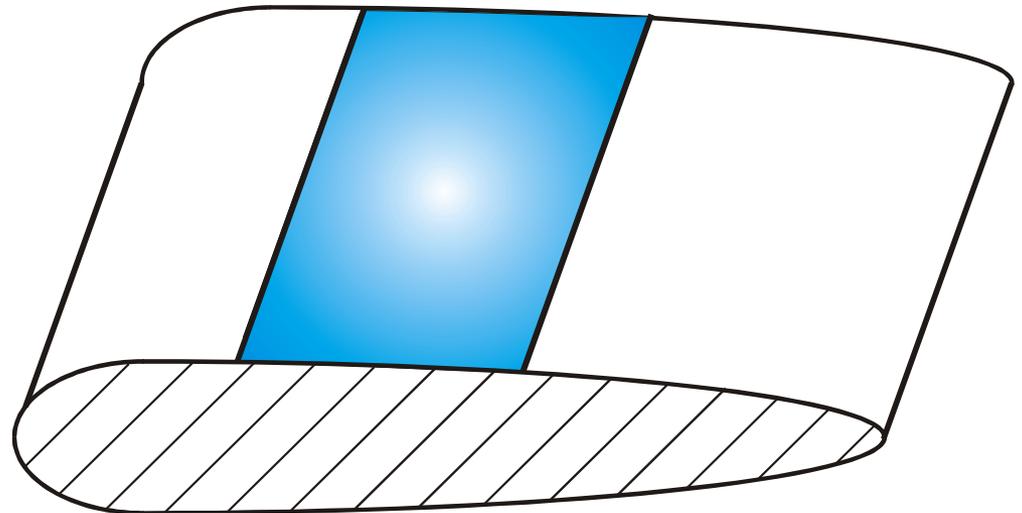
3.2.4.2 Reibungseffekte (6) - laminare Ablöseblase

Typ der Kavitation

Band- oder Ringkavitation (zusammenhängendes Dampfgebiet)

Einflussfaktoren

Ablöseblase nur in begrenztem Reynolds-Bereich



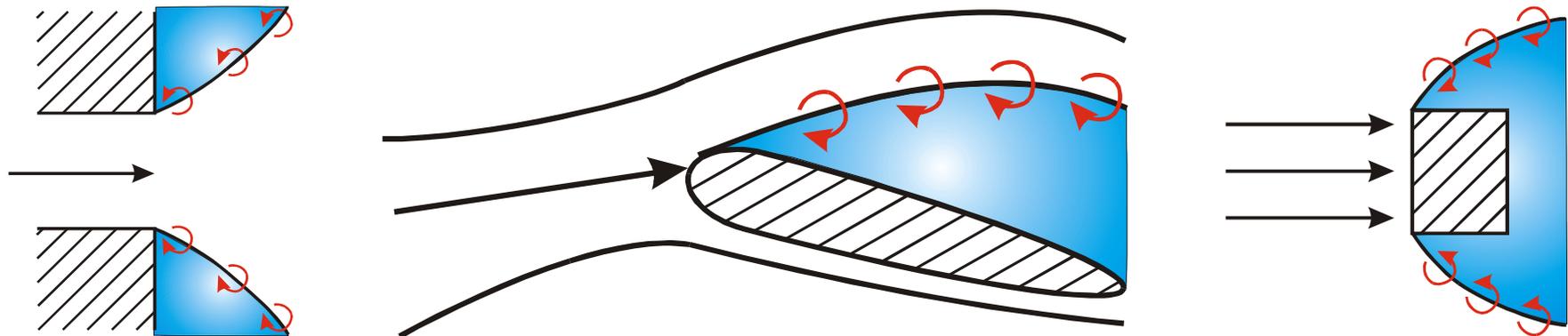
3.2.4.2 Reibungseffekte (7) - frei Scherschichten

Grenzschicht mit vollständiger Ablösung

(z.B.: stumpfe Körper, zu stark angestellte Profile, scharfkantige Konturen)

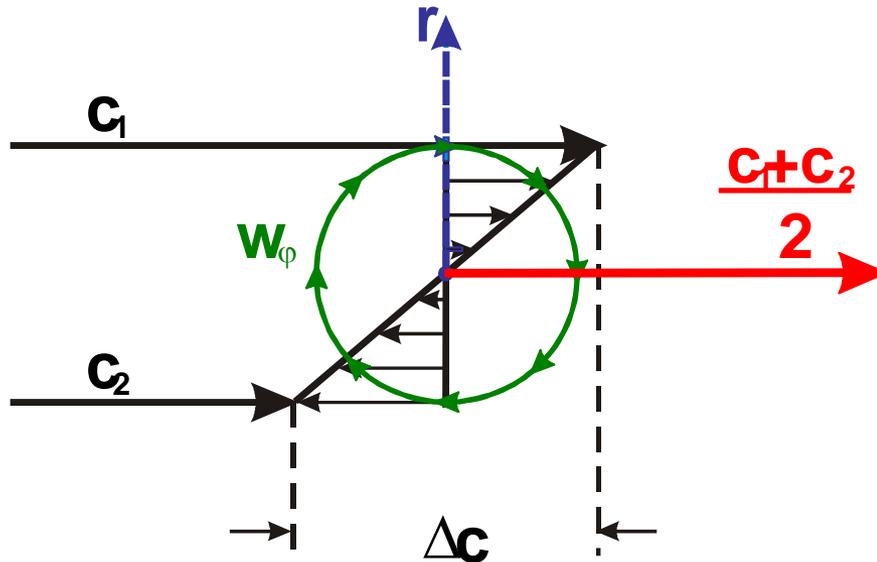
⇒ freie Scherschichten

d.h. Trennung der Strömungsschichten mit unterschiedlicher Geschwindigkeit
(Grenze zwischen Strömung und Totwassergebiet)



 Wirbel  Totwassergebiete

3.2.4.2 Reibungseffekte (8) - frei Scherschichten



wegen $\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \cdot \frac{w_\varphi^2}{r}$

ist $p_{\min} = p_\infty - k \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \Delta c^2$

$k \approx 0,6 \div 1,0$

Ort des Kavitationsbeginns

Im Kern der Wirbel innerhalb der freien Scherschicht

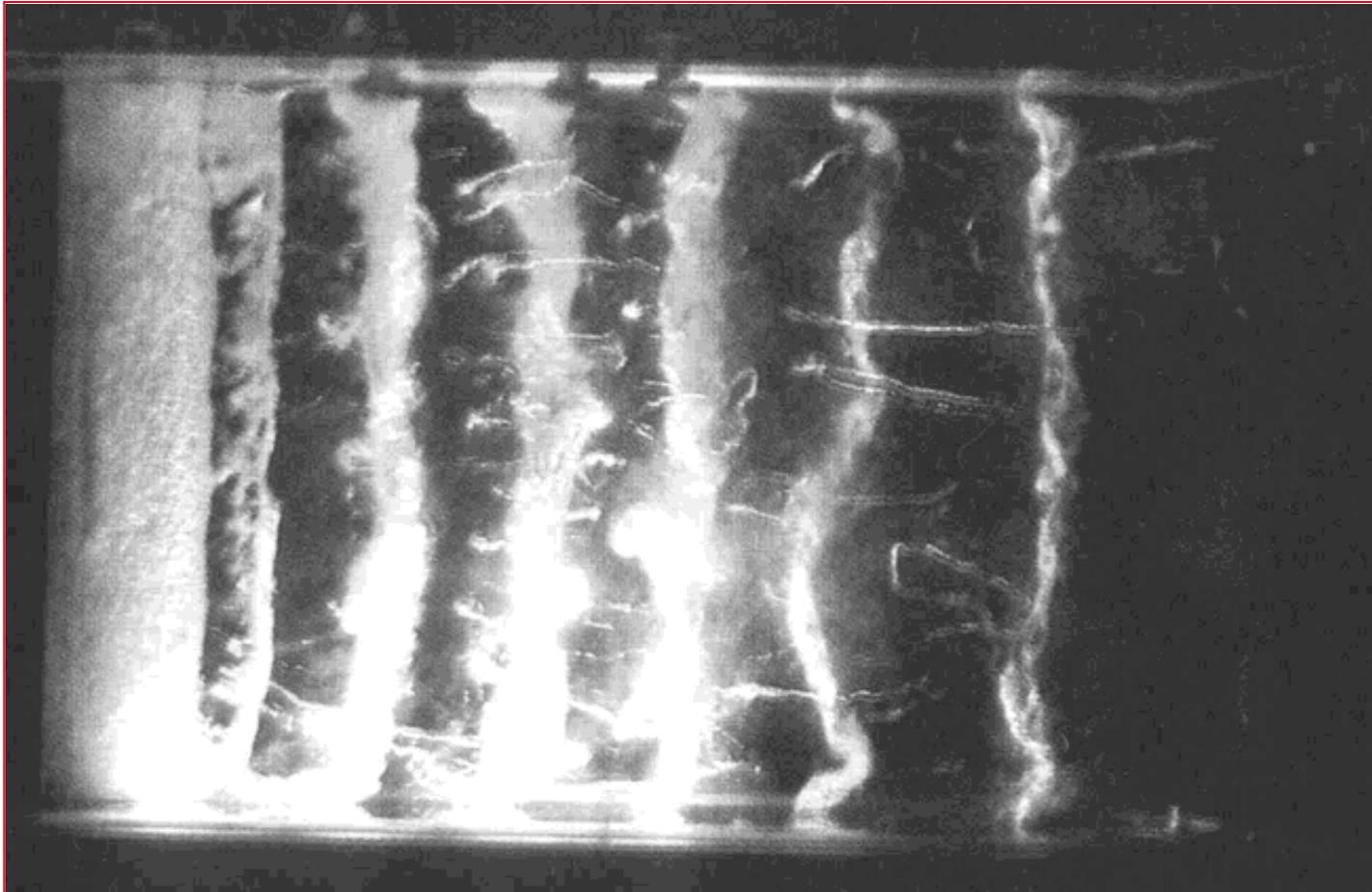
Typ der Kavitation

Wirbelkavitation

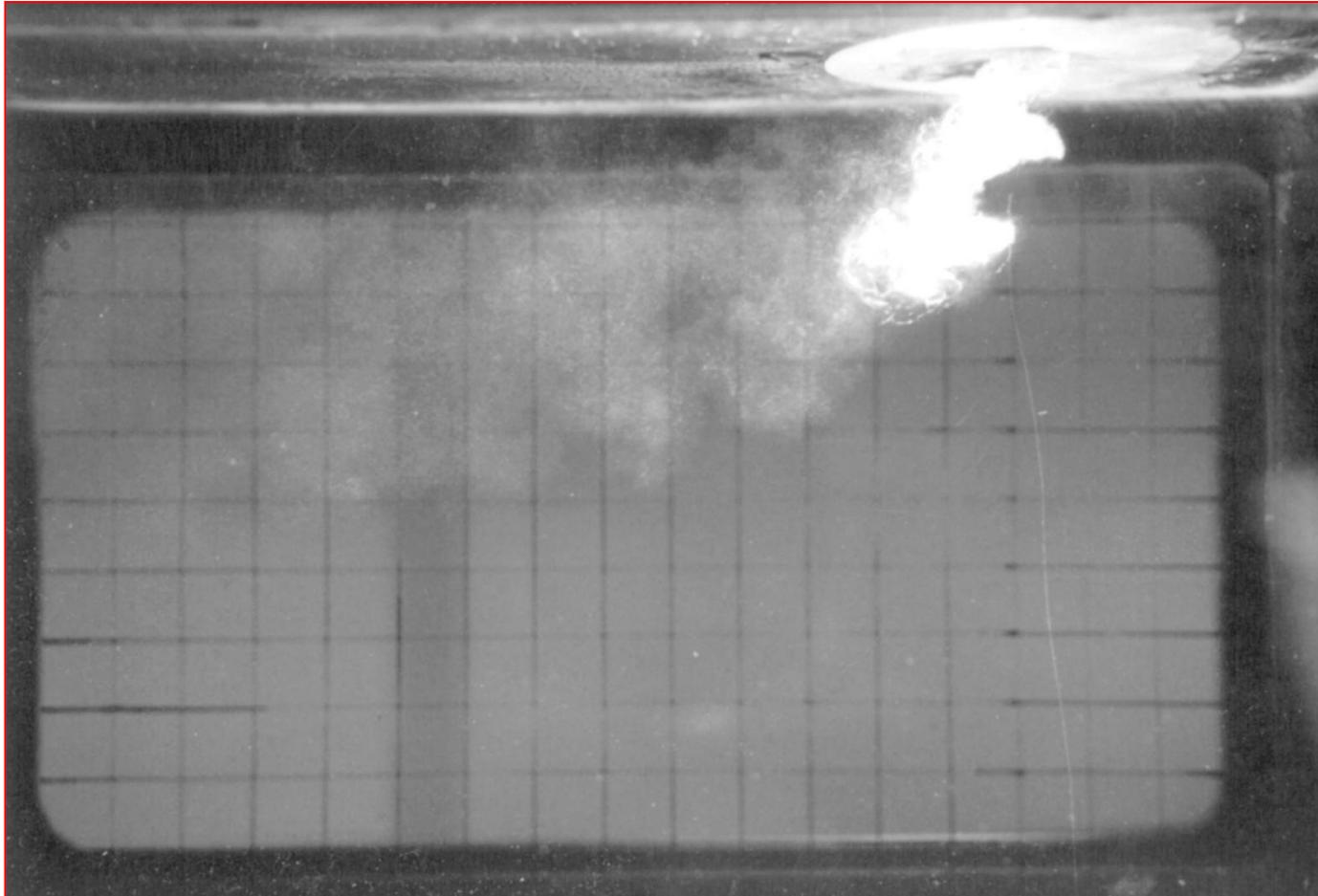
Einflussfaktoren

- starker Einfluss des Keimgehaltes
- σ_i steigt mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Reynoldszahl

3.2.4.2 Reibungseffekte (9) - freie Scherschichten



3.2.4.2 Beispiel Reibungseffekte (10) - Strahlvermischungszone



3.2.4.2 Reibungseffekte (11) - Rauigkeit

Arten

- Einzelrauigkeiten (z.B.: Grate, Kerben, Farbreste)
- verteilte Rauigkeiten (vom Fertigungsprozess herrührend)

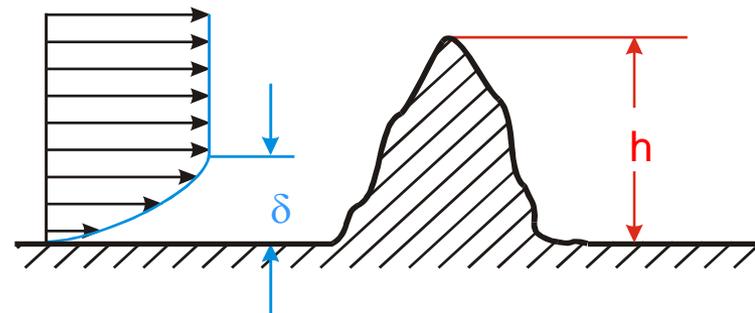
Wirkung



Zusätzliche Verwirbelung und Druckabsenkung hinter den Rauigkeitserhebungen.

$$c_{p, \text{rauh}}^* = c_{p, \text{glatt}}^* - (1 - c_{p, \text{glatt}}^*) \cdot c_{p, R}$$

$$c_{p, R} = f\left(\text{Rauigkeiten}, \frac{h}{\delta}, \text{Re}\right)$$



3.2.4.2 Reibungseffekte (12) - Rauigkeit

Ort des Kavitationsbeginns

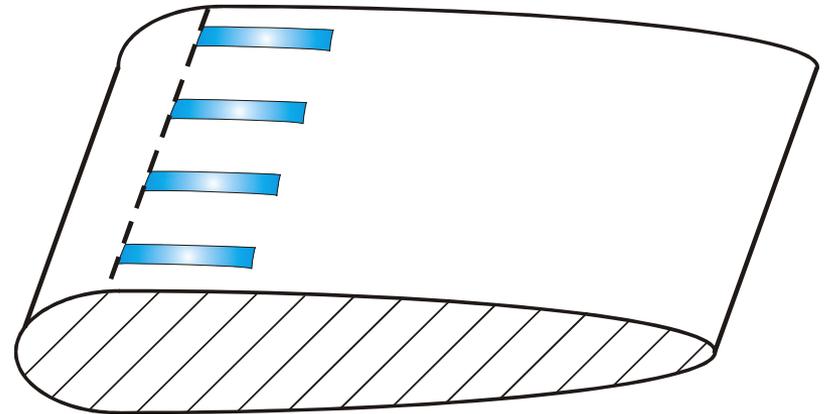
Im Bereich des Minimums von $c_{p, \text{glatt}}$ (Kern der Wirbel)
unmittelbar an den höchsten Rauigkeiten

Typ der Kavitation

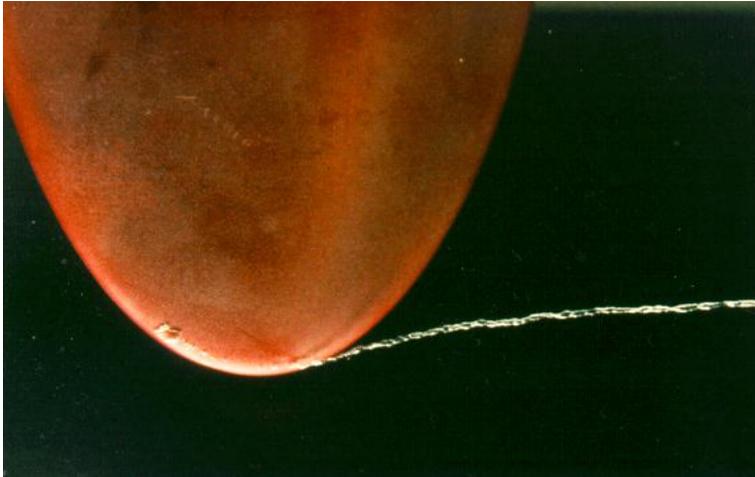
Anhaftende Streifen

Einflussfaktoren

- Rauigkeitsform und -höhe
- Reynoldszahl und Grenzschichtdicke δ
- Verhältnis h/δ



3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss (1)

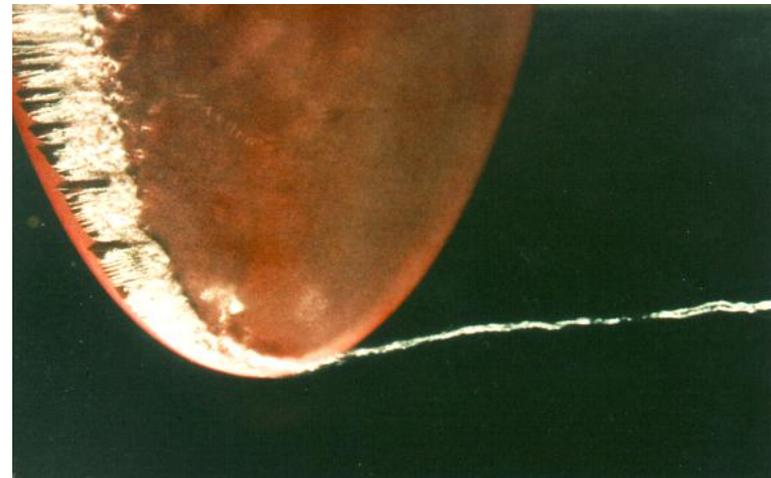


$$c_0 = 5,0 \text{ m/s}$$

$$\sigma = 2,49$$

$$c_0 = 11,0 \text{ m/s}$$

$$\sigma = 2,49$$



3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss (2)



$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{c}{c_{\text{ref}}} \right)^2 \right]$$

mit:

Basiswert

σ_0 = charakteristische Kenngröße für bestimmte Körperform und Fortschrittsgrad der Kavitation

Referenzgeschwindigkeit

c_{ref} = f(Strömungstyp)

d.h. für bestimmte abgelöste Strömungen 12 m/s

Für Pumpen - Drehzahlmaßstabeffekt:

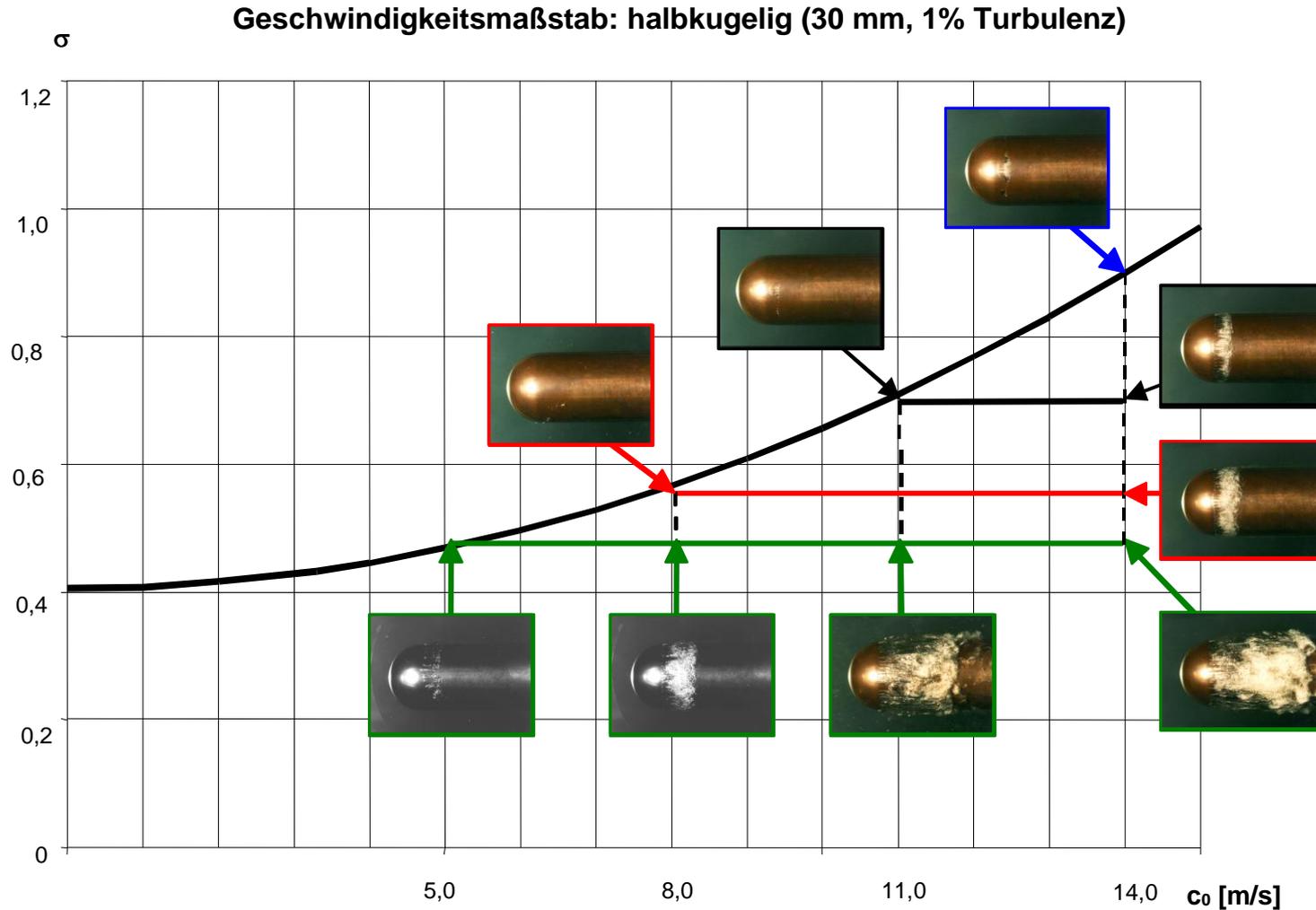
$$\sigma_u = \sigma_{u0} \cdot \left[1 + \left(\frac{u_{\text{la}}}{u_{\text{ref}}} \right)^2 \right]$$

mit:

σ_{u0} = Basiswert der Kavitationskennzahl σ_u für einen bestimmten Betriebszustand

u_{ref} = charakteristische Bezugs-Umfangsgeschwindigkeit

3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss (3)



3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss (4)

