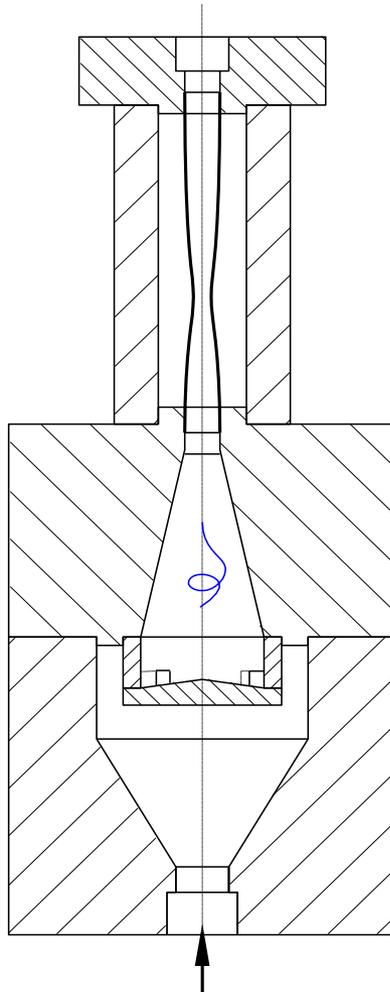


3.2.1.1 Keimgehalt - Wirbeldüse

(12/16)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Funktionsprinzip

Überlagerung von

- Wirbelströmung
- Düsenströmung

liefert im engsten Querschnitt

$$p_{WK} = p_{WD} - K Q_{WD}^2$$

p_{WK} = Druck im Wirbelkern

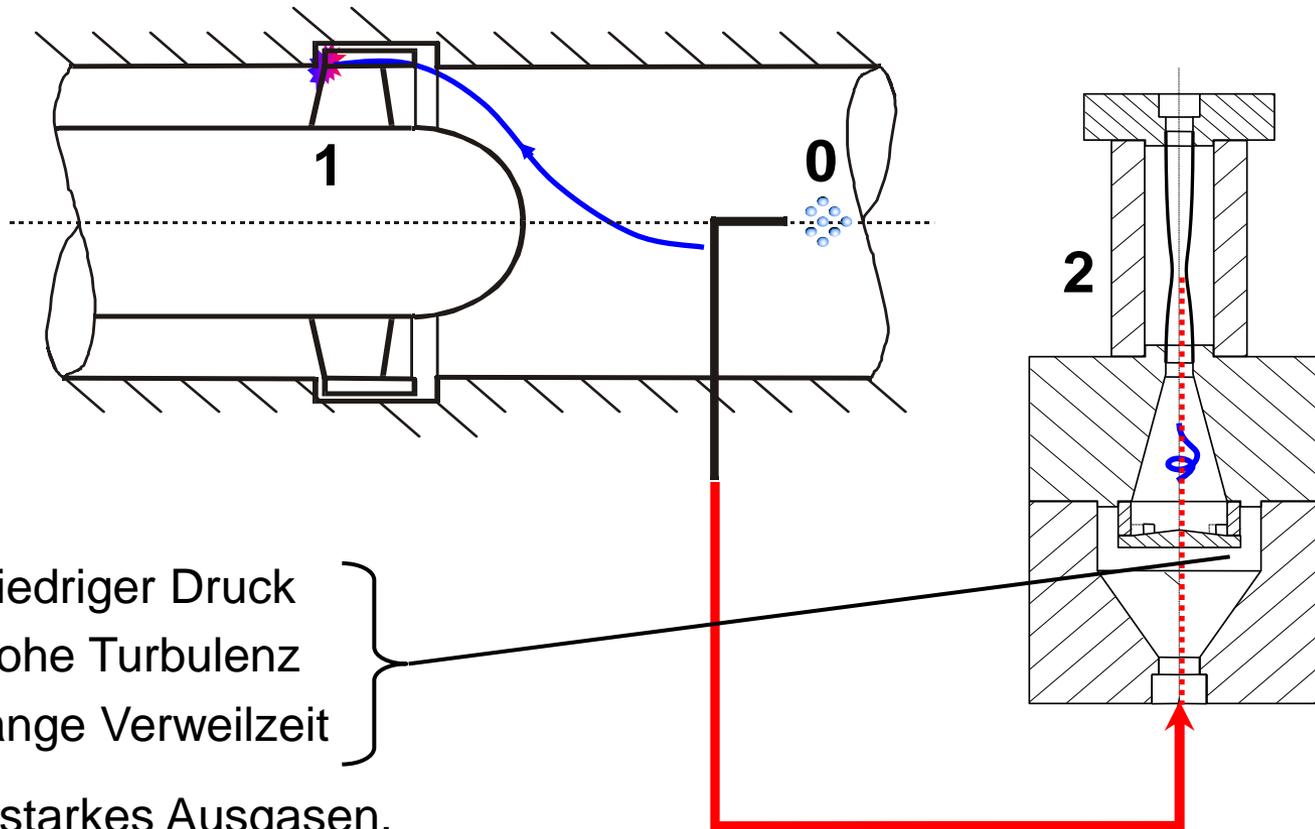
p_{WD} = Druck vor dem Eintritt in die Wirbeldüse

Q_{WD} = Durchfluss durch die Wirbeldüse

K = Kalibrierfaktor

= f(Geometrie, Grenzschicht, Reibung)

3.2.1.1 Keimgehalt (13/16) - Einsatz der Wirbel- düse am Prüfstand und Ihre Nachteile



- niedriger Druck
- hohe Turbulenz
- lange Verweilzeit

Ggf. starkes Ausgasen,
Entstehen von Keimen,
die Wasserqualität ändert sich.

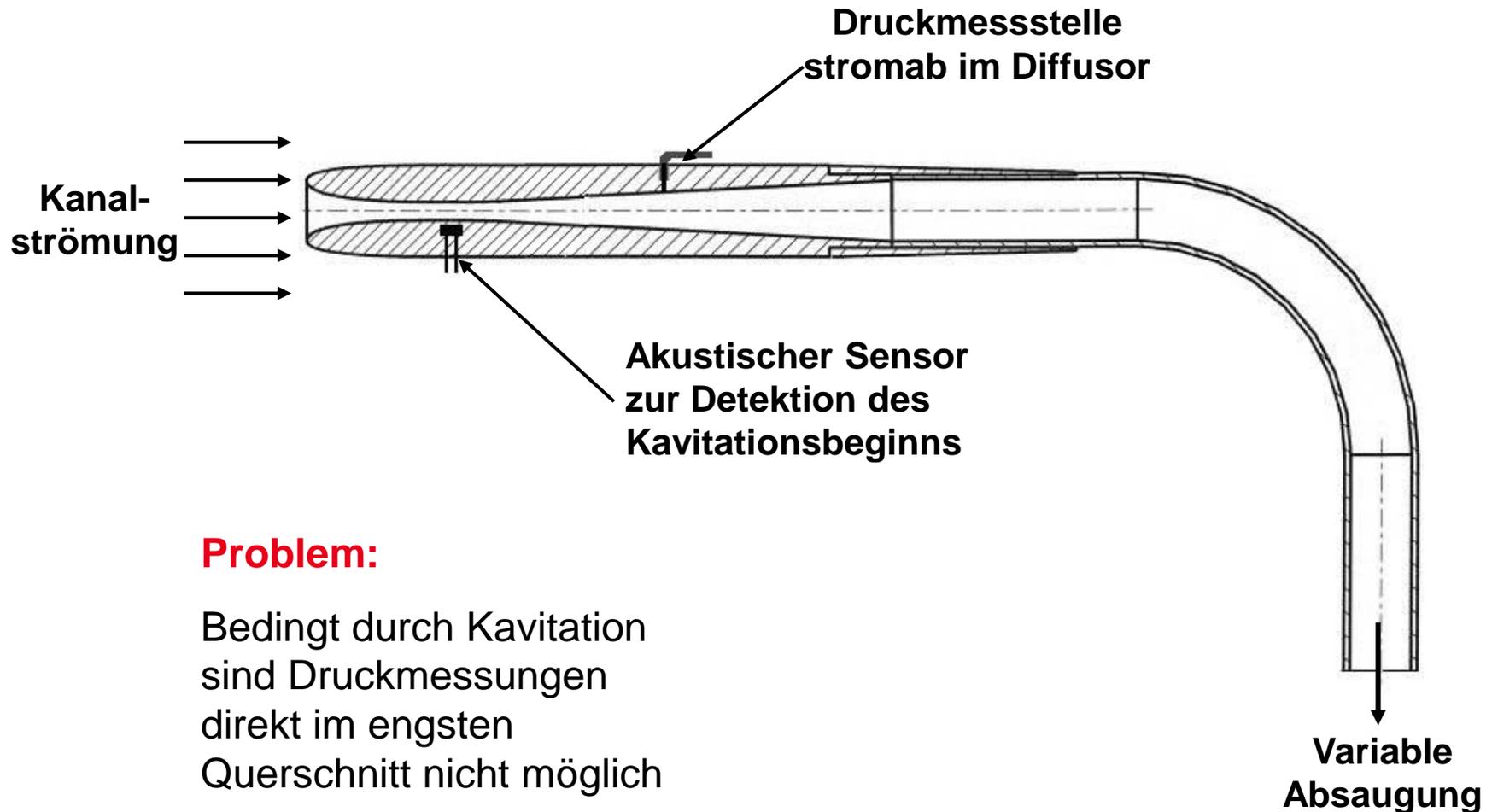
⇒ modifizierte Kavitationszahl
nicht anwendbar

3.2.1.1 Keimgehalt - Aufbau der in-situ-Düse

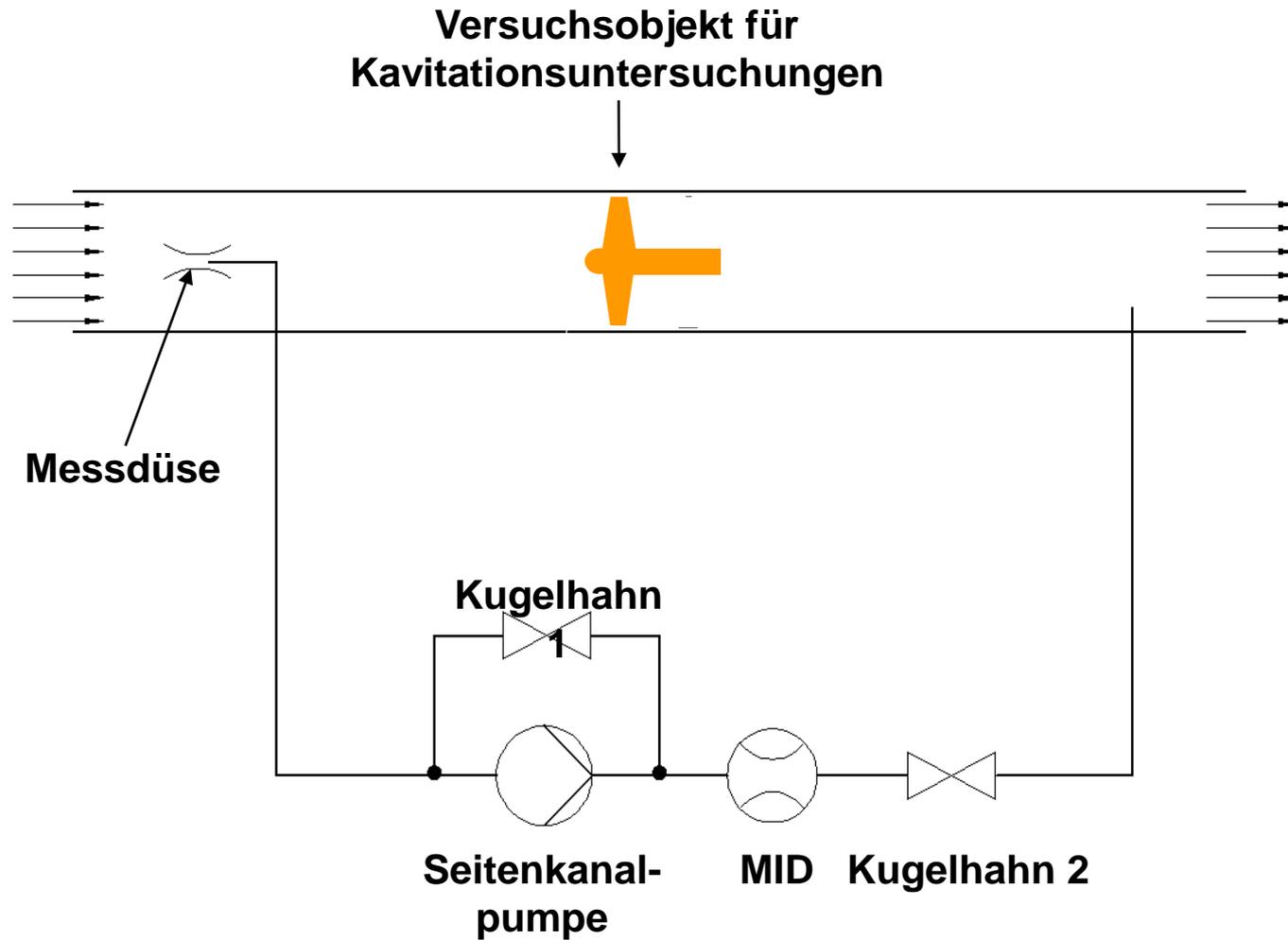
(14/16)



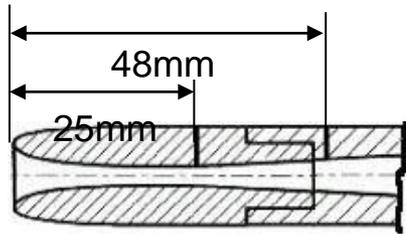
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



3.2.1.1 Keimgehalt (15/16) - Einsatz der in-situ-Düse am Prüfstand



3.2.1.1 Keimgehalt (16/16) - Durchflusscharakteristik der in-situ-Düse (Messung/Simulation)

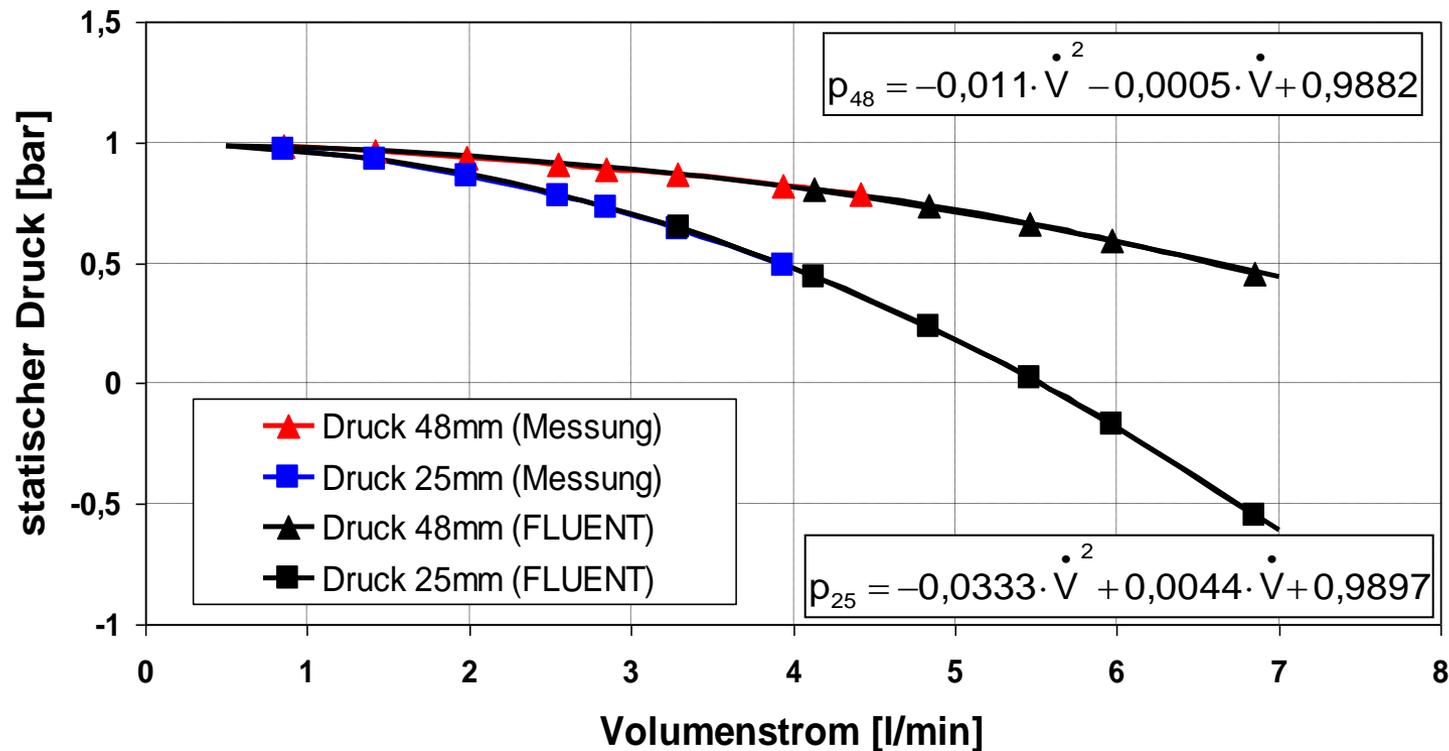


Druckdifferenz (Düsencharakteristik):

$$\Delta p = p_{48} - p_{25} = 0,0223 \cdot \dot{V}^2 - 0,0049 \cdot \dot{V} - 0,0015$$

Zugspannung:

$$Z_f = p_v - (p_{48} - \Delta p)$$



3.2.1.2 Zugfestigkeit

(1/4)

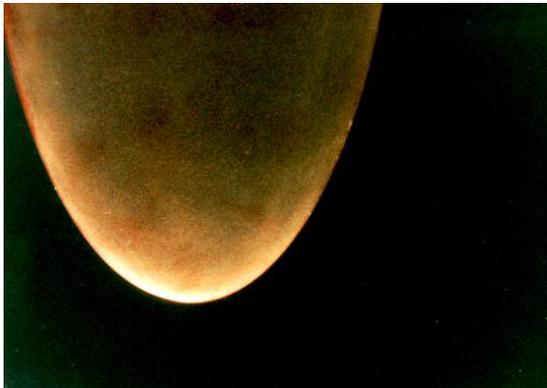


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

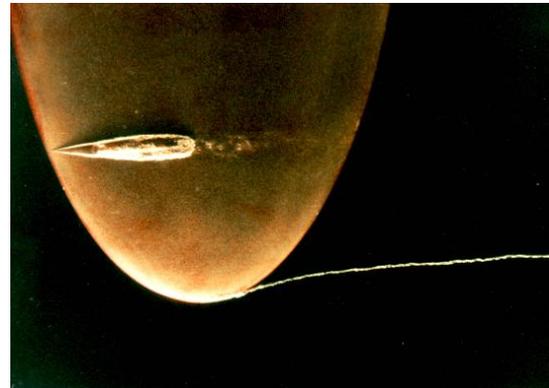
Definition:

$$Z = p_v(\vartheta) - p_{WK} = p_v(\vartheta) - p_{WD} + K \cdot Q_{WD}^2$$

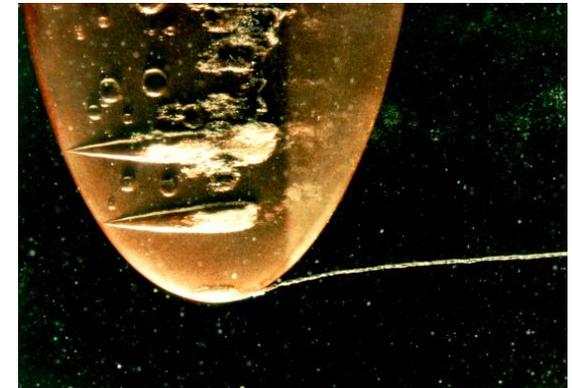
$$p_v(\vartheta) = \text{Dampfdruck}$$



$Z > 0$
„zugfestigkeitsbehaftet“



$Z = 0$
„zugfestigkeitsfrei“



$Z < 0$
negative Zugfestigkeit
(Pseudokavitation)

$$c_0 = 9,50 \text{ m/s}; \sigma = 0,69$$

3.2.1.2 Zugfestigkeit

(2/4)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Berücksichtigung der Zugfestigkeit

Einführung der „modifizierten Kavitationskennzahl“

$$\sigma_i' = \frac{p_0 - p_{\text{krit}}}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2} = \frac{p_0 - (p_v - p_{\text{ts}})}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2}$$

mit: $p_{\text{ts}} = c \cdot Z$

$$0,26 \leq c \leq 0,46$$

$$\sigma_i' = \sigma_i + \Delta\sigma_{\text{ts}}$$

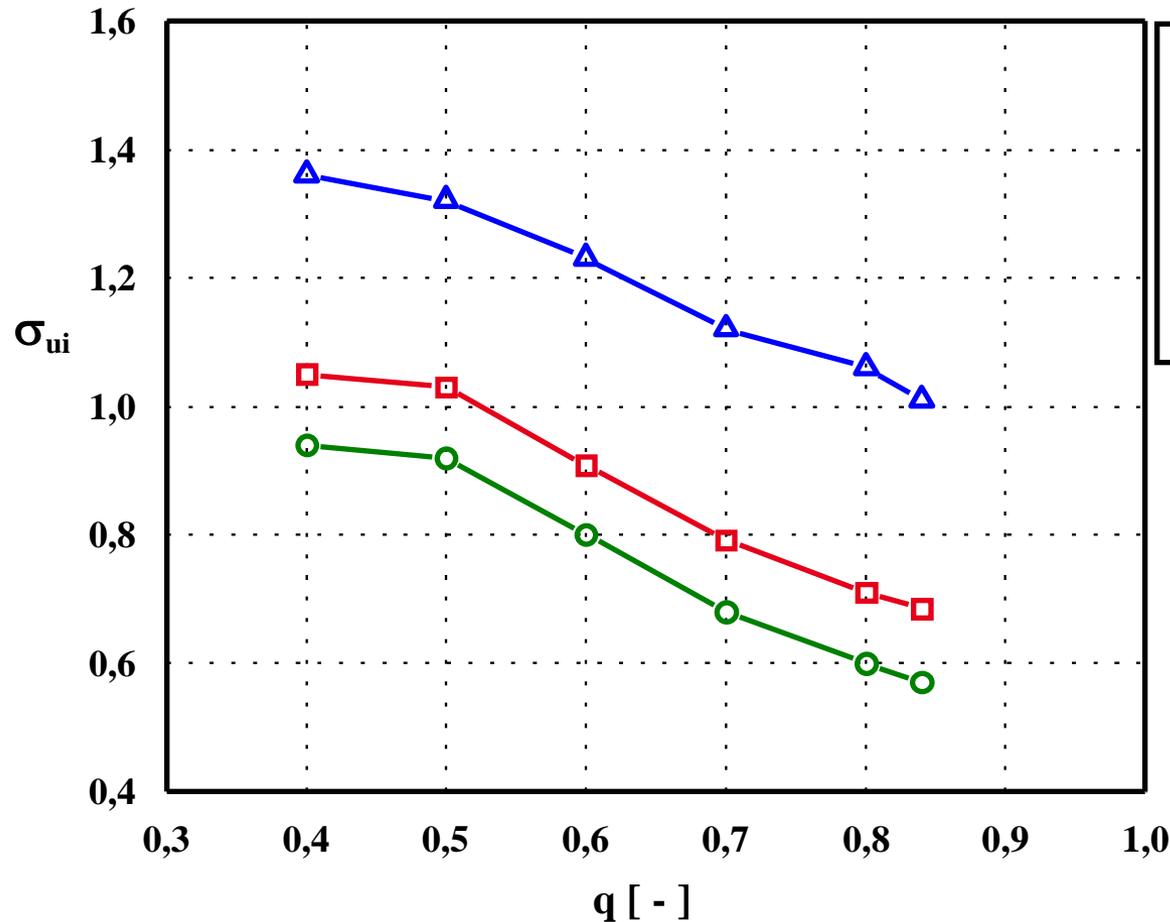
mit: $\Delta\sigma_{\text{ts}} = \frac{p_{\text{ts}}}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2}$

3.2.1.2 Zugfestigkeit

(3/4)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



$n = 2000 \text{ min}^{-1}$

Gasgehalt: 0,98%

—△— Z = 0,00 bar

—□— Z = 0,45 bar

—○— Z = 0,60 bar

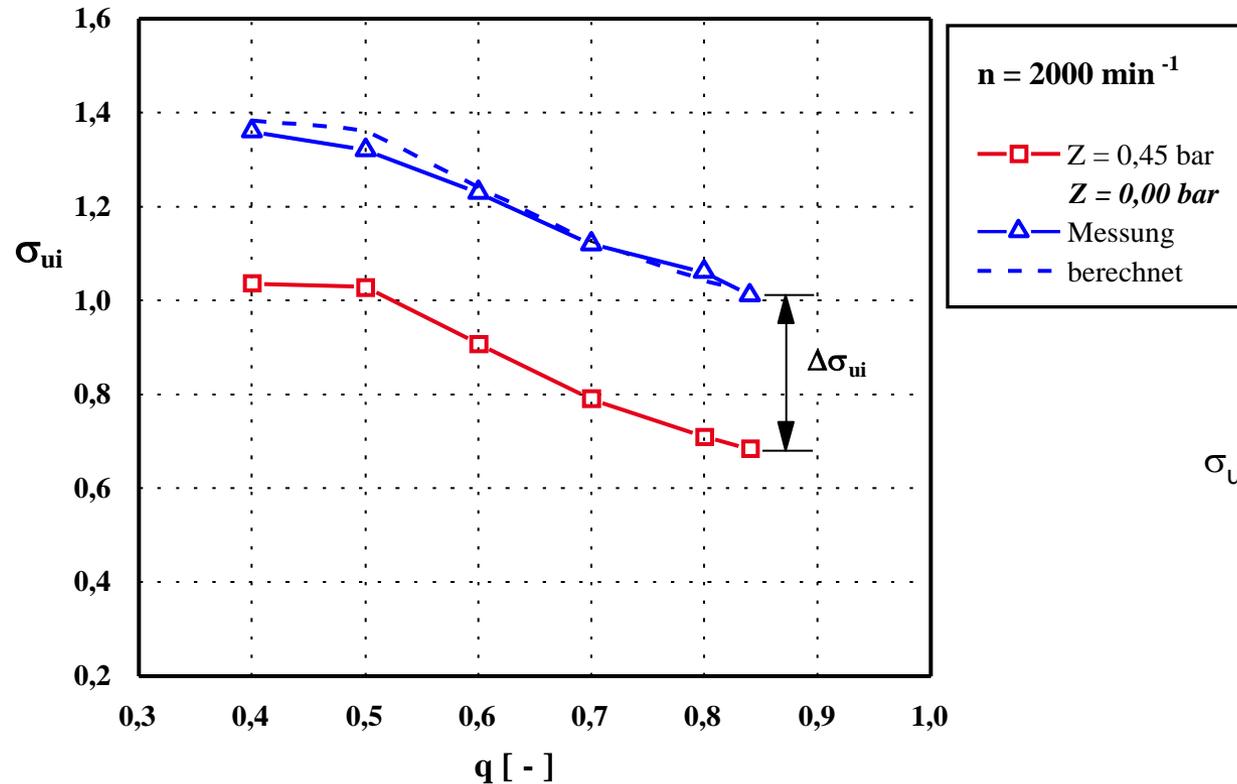
$$\sigma_{u,i} = \frac{p_{\text{tot},0} - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{1,a}^2}$$

3.2.1.2 Zugfestigkeit

(4/4)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



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

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

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:

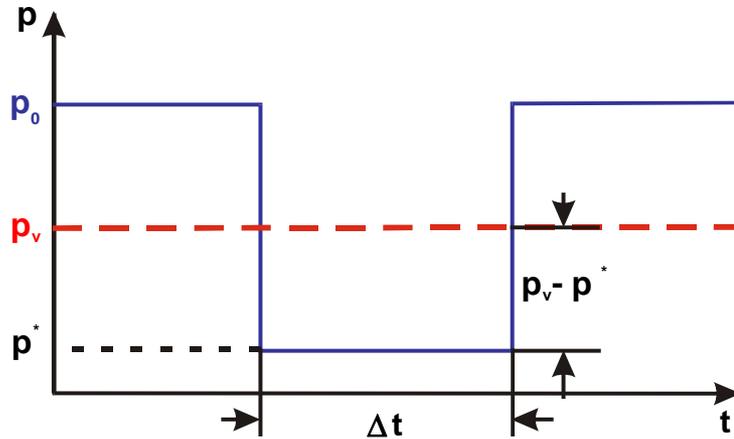
a.) akustische Zugänglichkeit

- 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 $R_{\max} = R_{Gr}$:

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

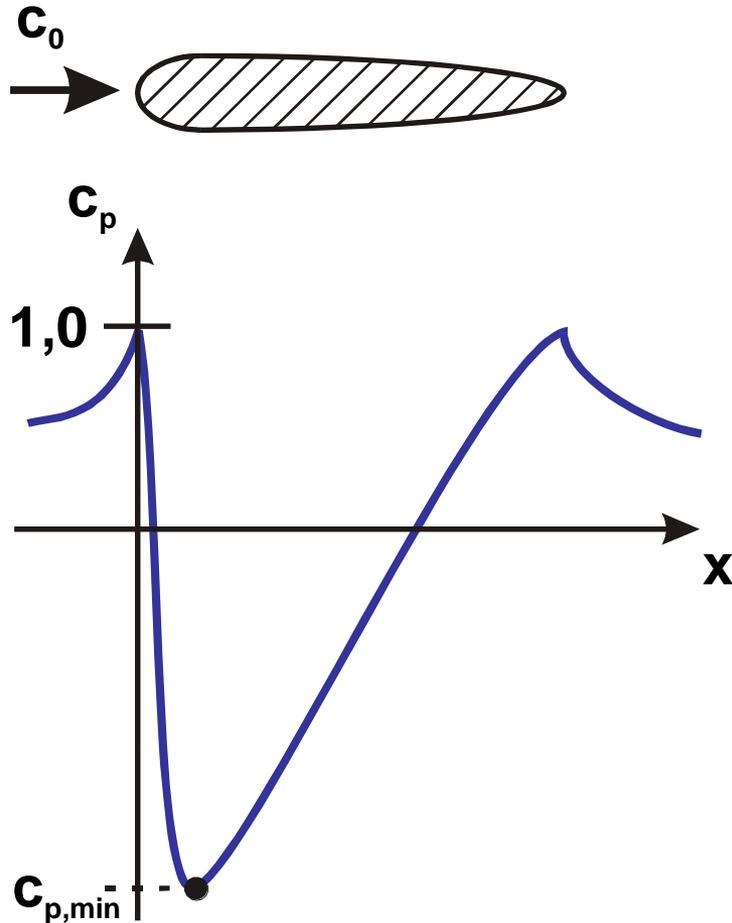
bzw.

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

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 - Turbulenz

(1/12)

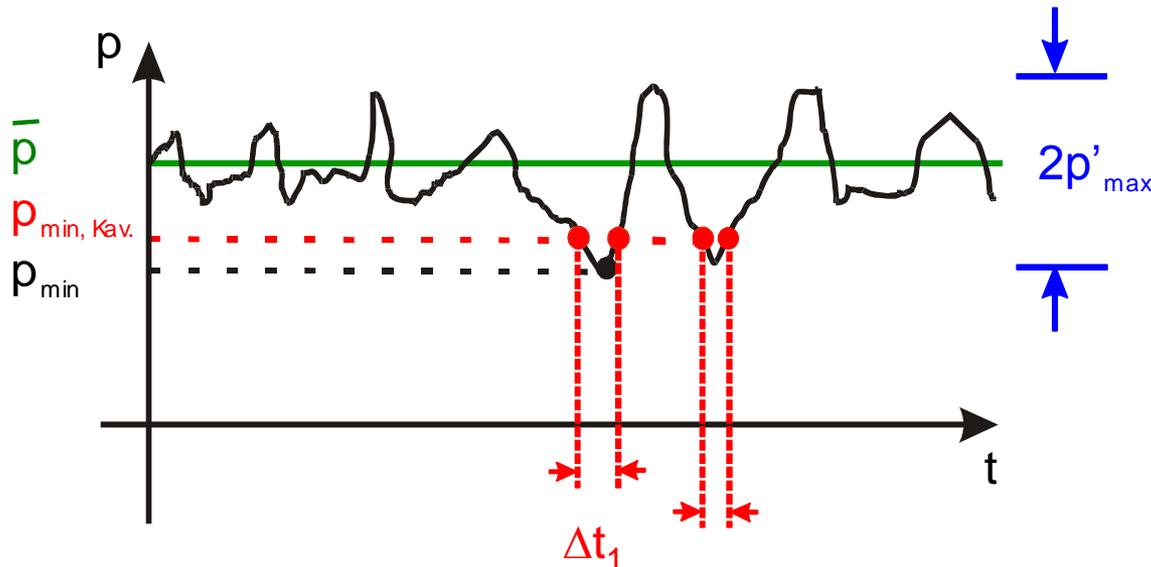


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

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

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 - turbulente Grenzschicht

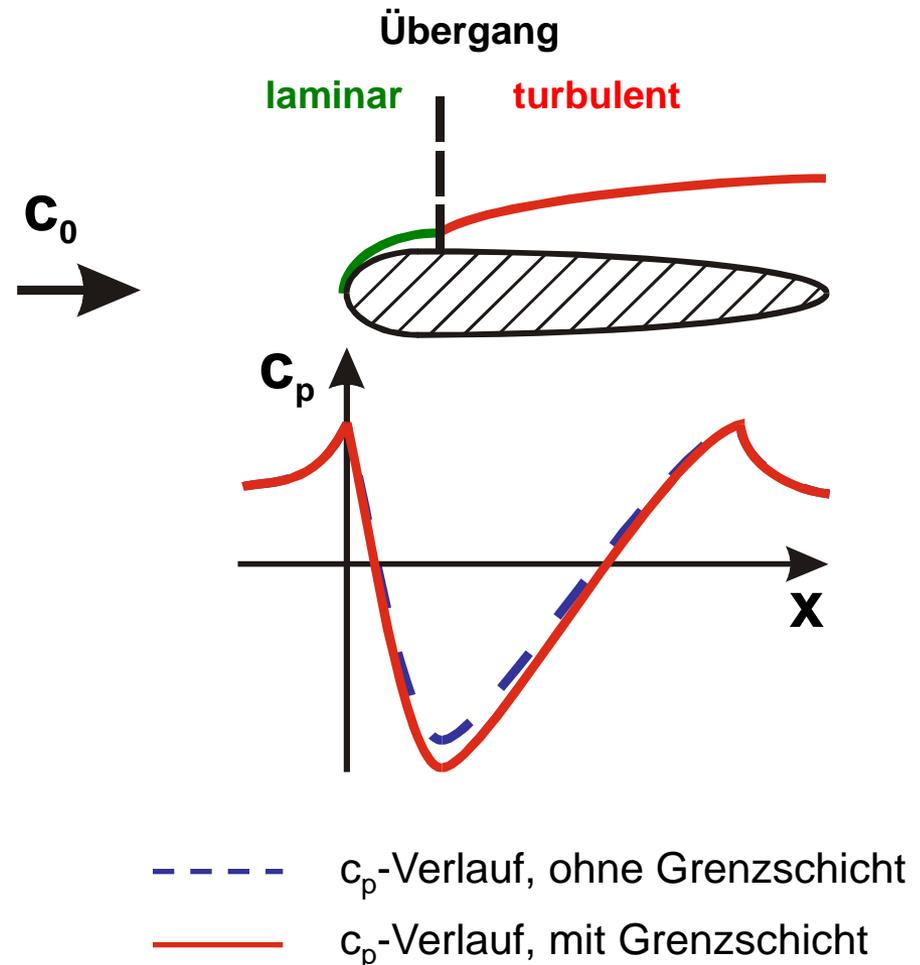
(2/12)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Grenzschicht ohne Ablösung

- laminare Grenzschicht
- Umschlag
- turbulente Grenzschicht



3.2.4.2 Reibungseffekte - turbulente Grenzschicht

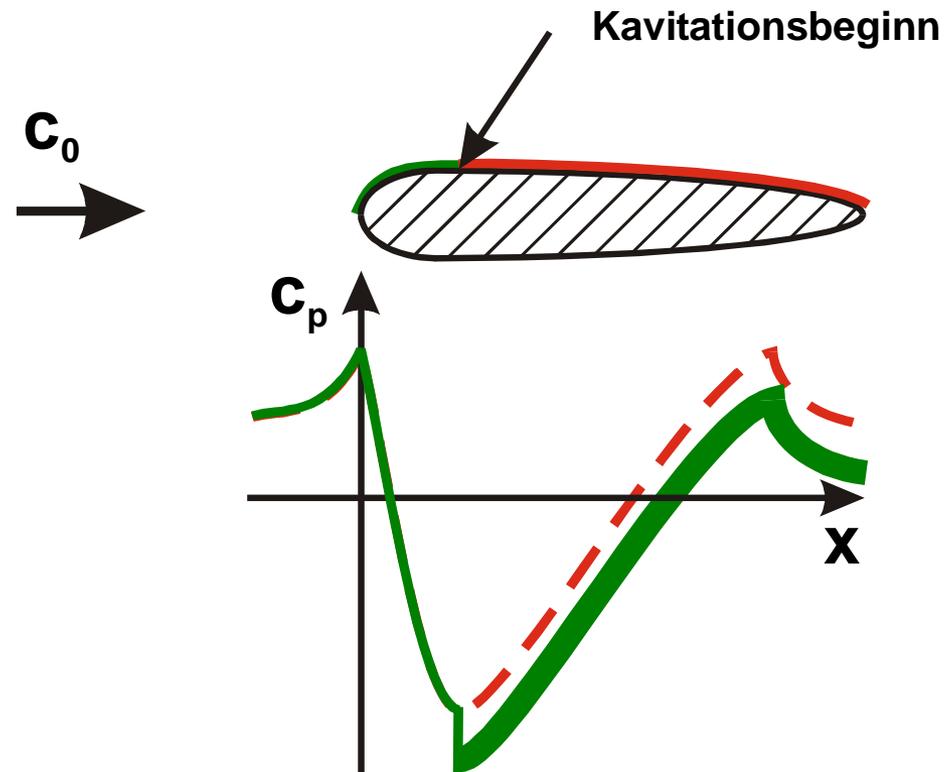
(3/12)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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 - turbulente Grenzschicht

(4/12)



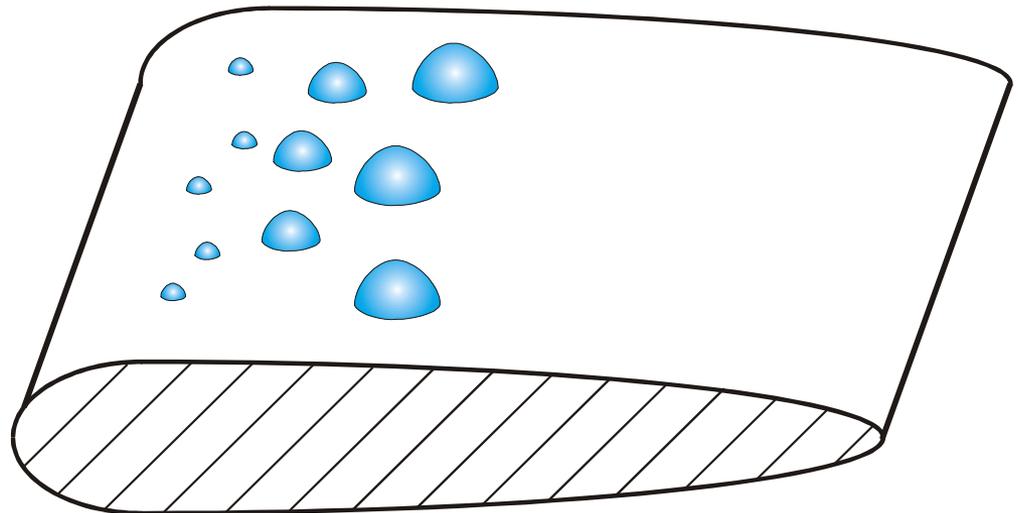
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Typ der Kavitation

Einzelblasen

Einflussfaktoren

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



3.2.4.2 Reibungseffekte - laminare Ablöseblase

(5/12)



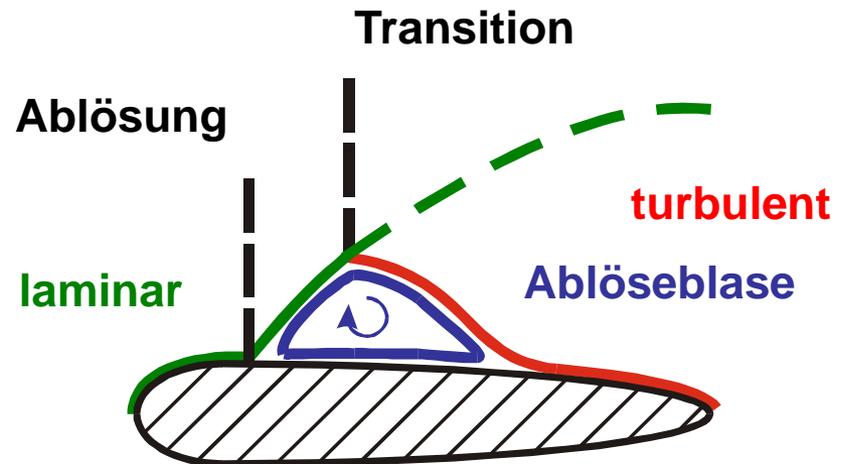
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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 - laminare Ablöseblase

(6/12)



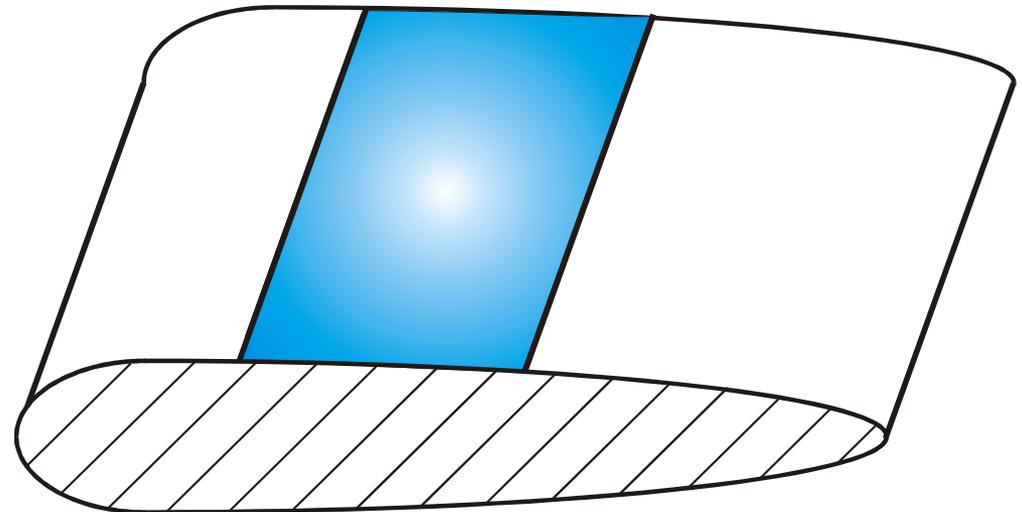
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Typ der Kavitation

Band- oder Ringkavitation (zusammenhängendes Dampfgebiet)

Einflussfaktoren

Ablöseblase nur in begrenztem Reynolds-Bereich



3.2.4.2 Reibungseffekte - frei Scherschichten

(7/12)



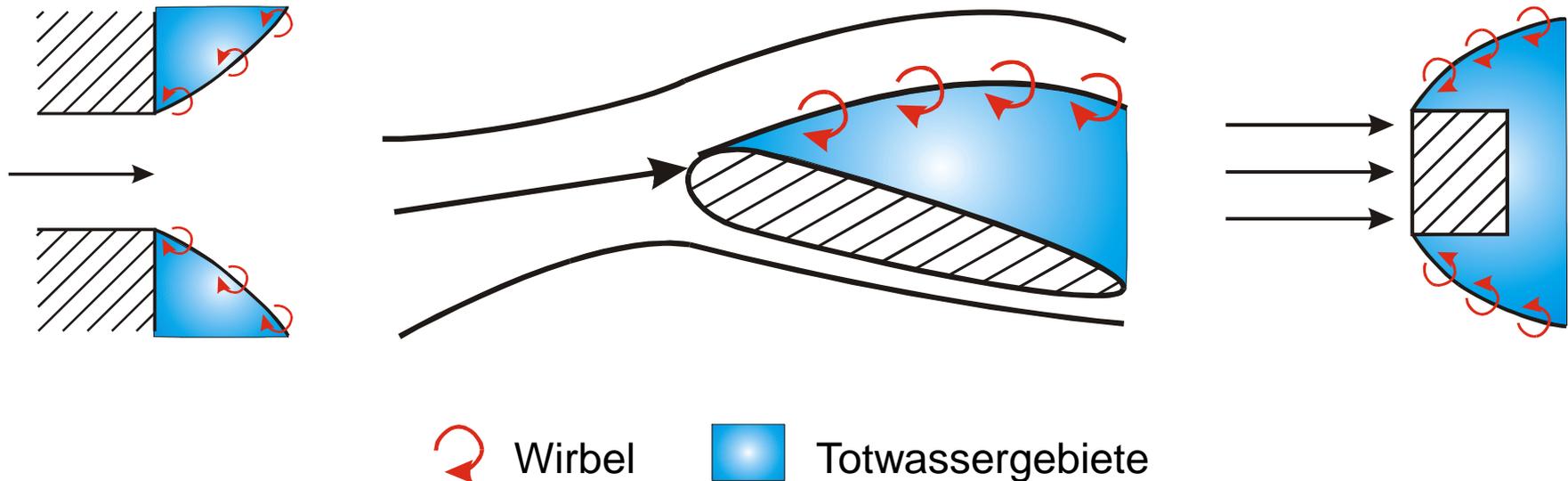
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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)

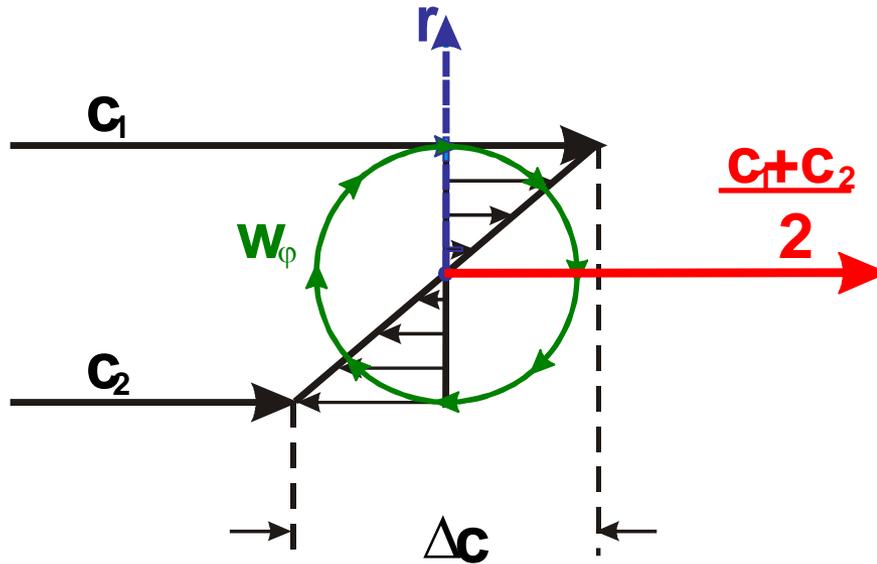


3.2.4.2 Reibungseffekte - frei Scherschichten

(8/12)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



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

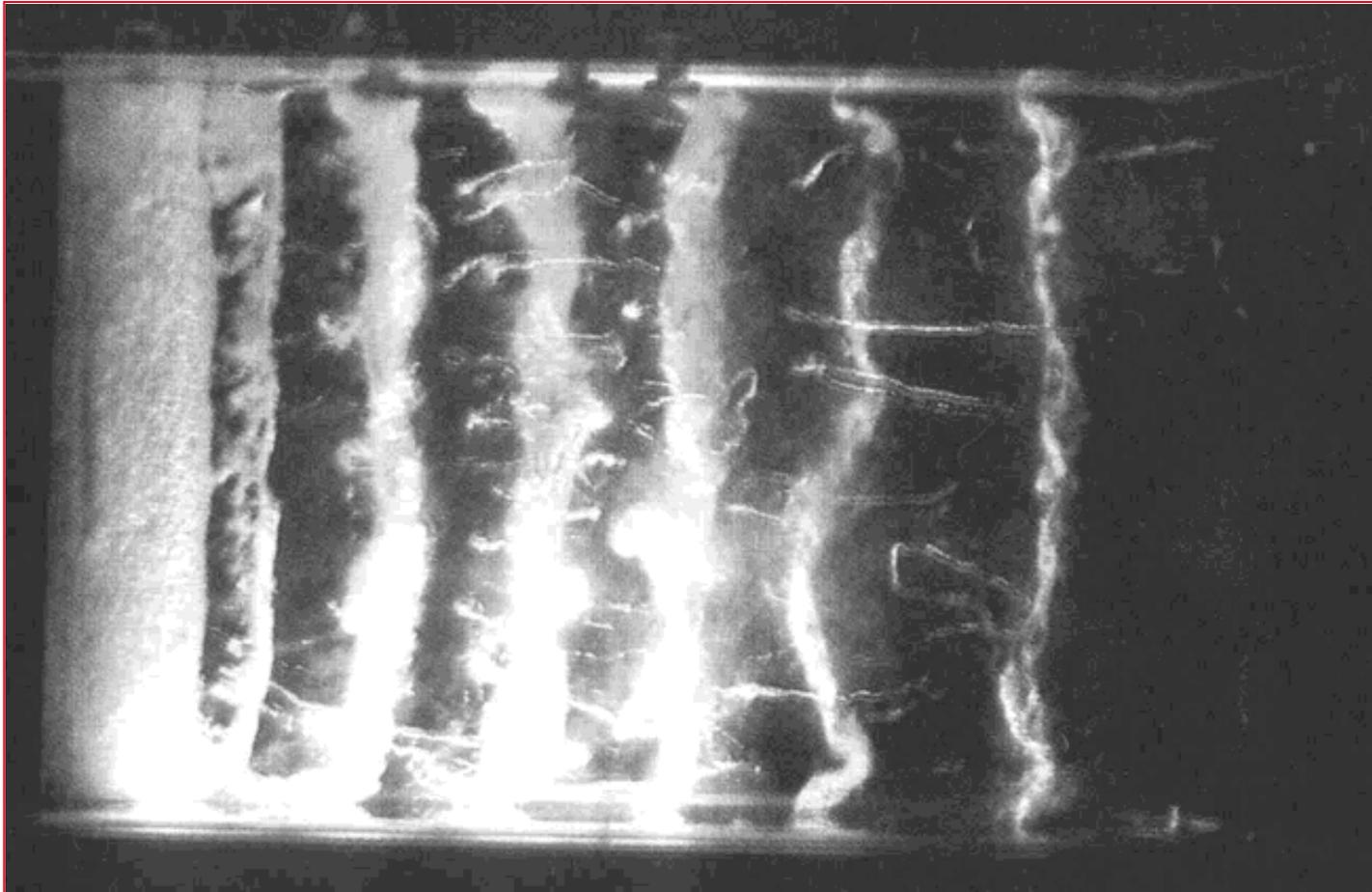
- starker Einfluss des Keimgehaltes
- σ_i steigt mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Reynoldszahl

3.2.4.2 Reibungseffekte - freie Scherschichten

(9/12)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

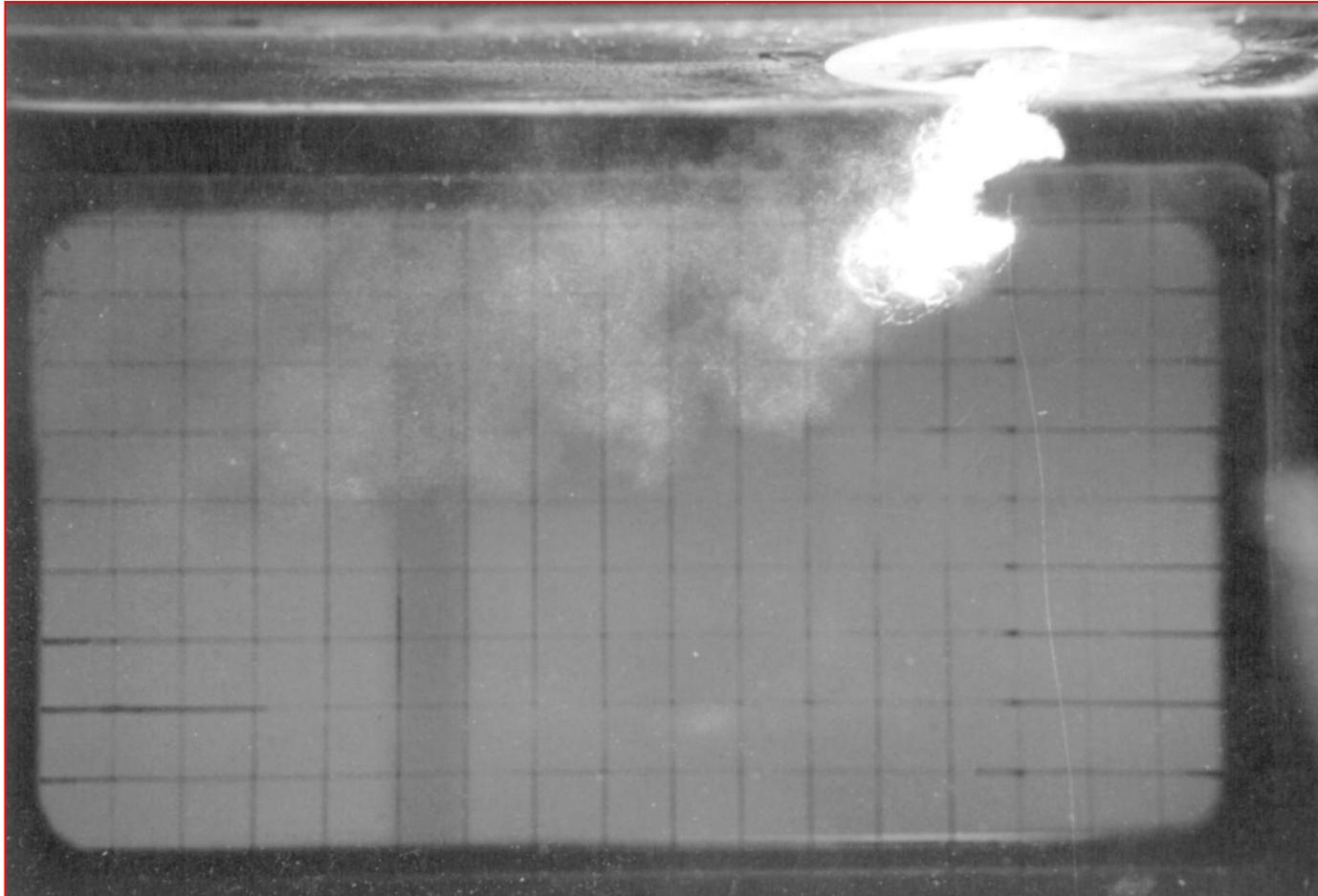


3.2.4.2 Beispiel Reibungseffekte - Strahlvermischungszone

(10/12)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

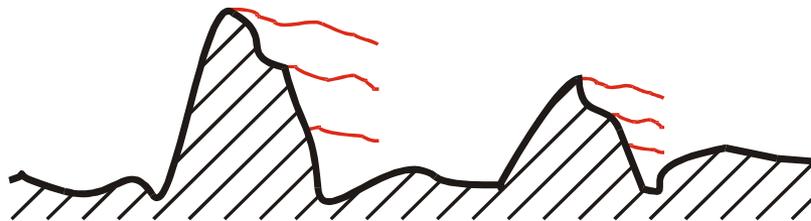


3.2.4.2 Reibungseffekte (11) - Rauigkeit

Arten

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

Wirkung



Zusätzliche Verwirbelung und Druckabsenkung hinter den Rauigkeitserhebungen.

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

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

