

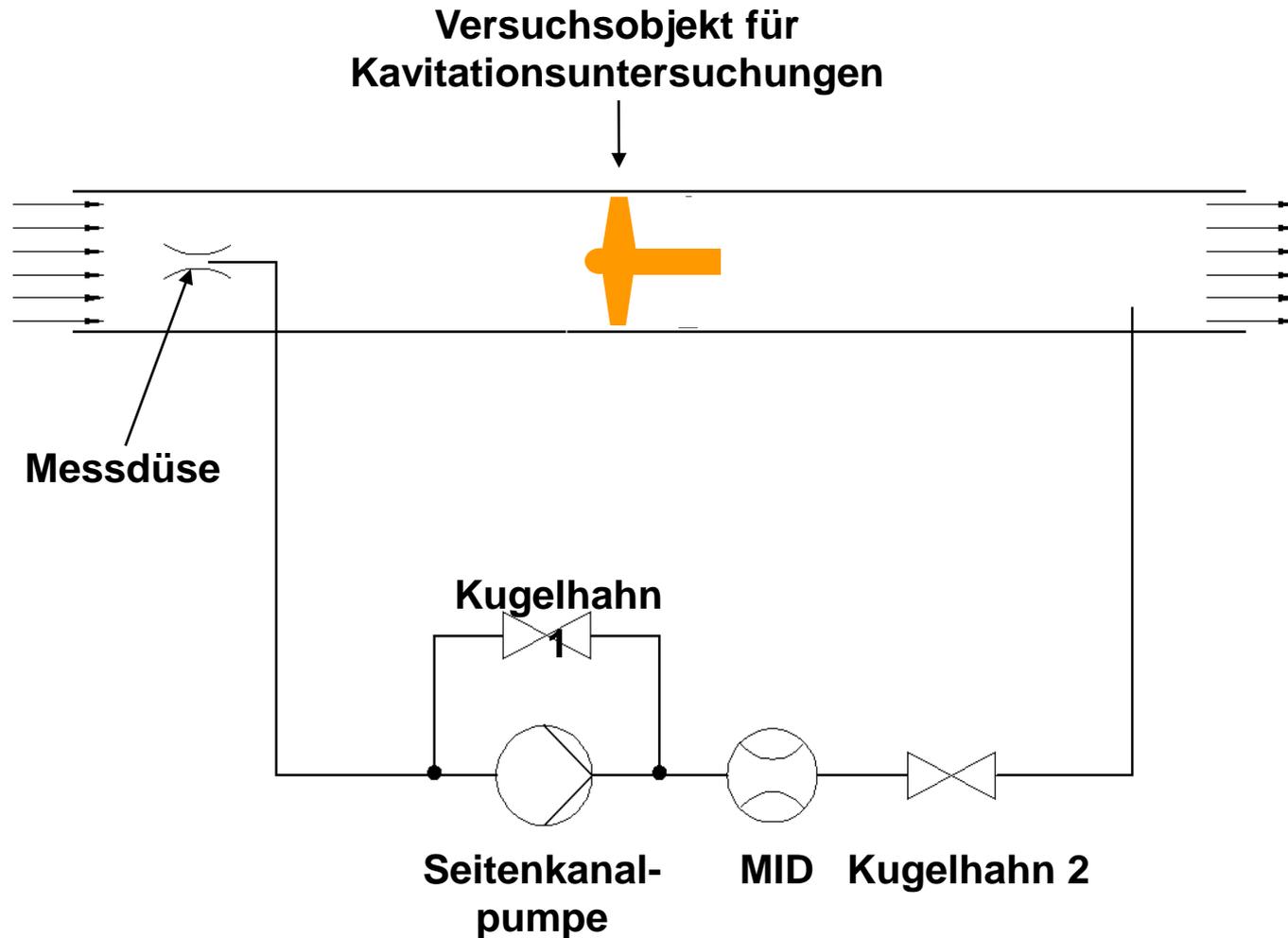
3.2.1.1 Keimgehalt

(15/16)

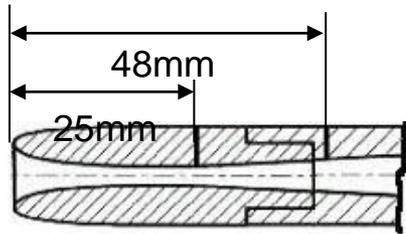


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Einsatz der in-situ-Düse am Prüfstand



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

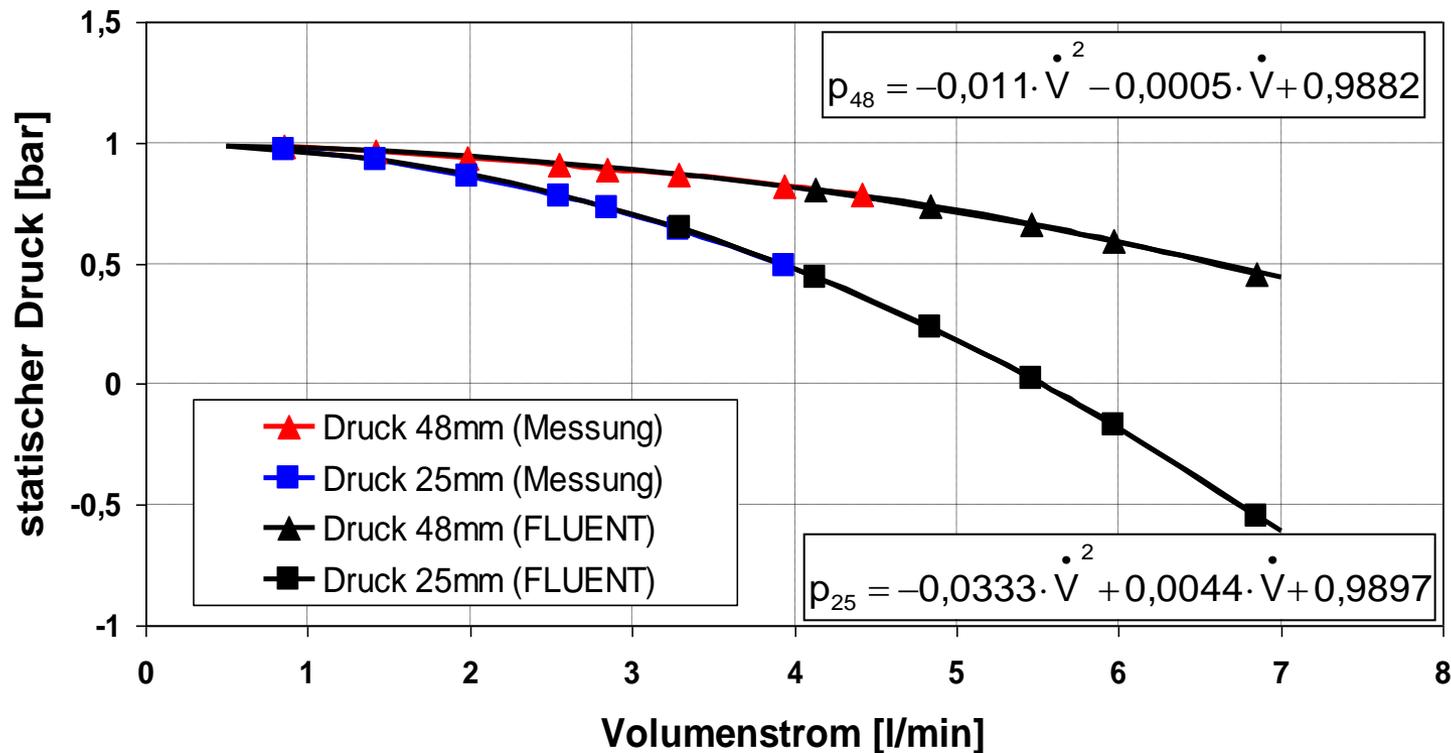


Druckdifferenz (Düsencharakteristik):

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

Zugspannung:

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



3.2.1.2 Zugfestigkeit

(1/4)

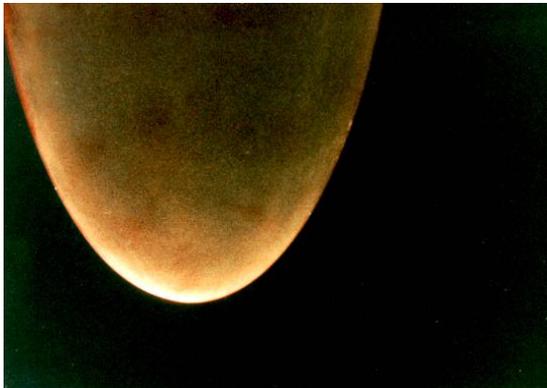


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Definition:

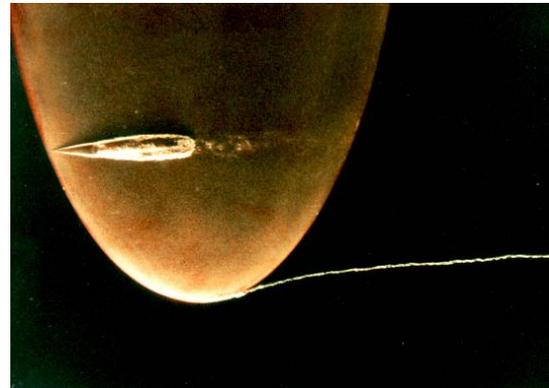
$$Z = p_v(\vartheta) - p_{WK} = p_v(\vartheta) - p_{WD} + K \cdot Q_{WD}^2$$

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



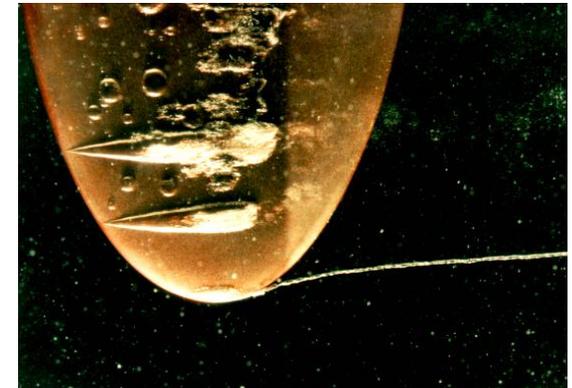
$$Z > 0$$

„zugfestigkeitsbehaftet“



$$Z = 0$$

„zugfestigkeitsfrei“



$$Z < 0$$

negative Zugfestigkeit
(Pseudokavitation)

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



Berücksichtigung der Zugfestigkeit

Einführung der „modifizierten Kavitationskennzahl“

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

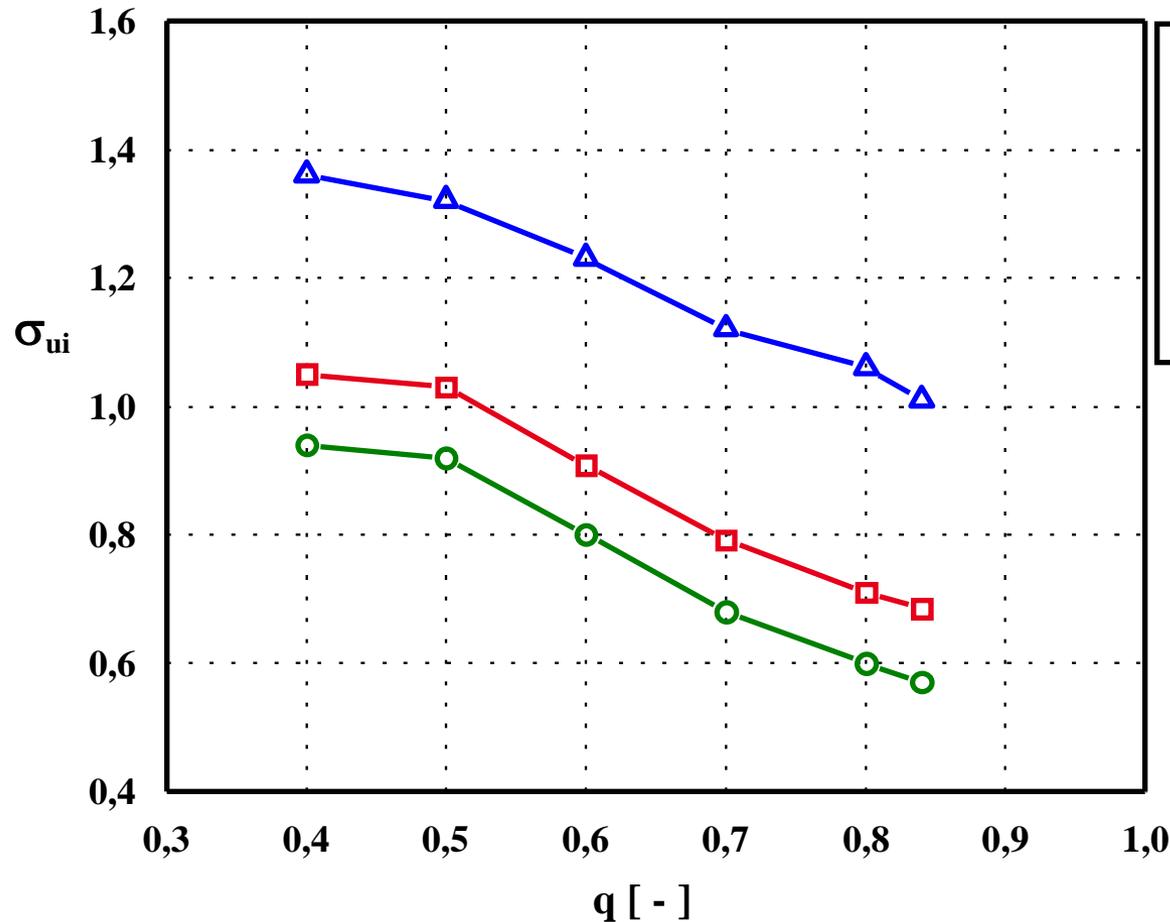
mit: $p_{\text{ts}} = c \cdot Z$

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

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

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

3.2.1.2 Zugfestigkeit



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

Gasgehalt: 0,98%

—△— Z = 0,00 bar

—□— Z = 0,45 bar

—○— Z = 0,60 bar

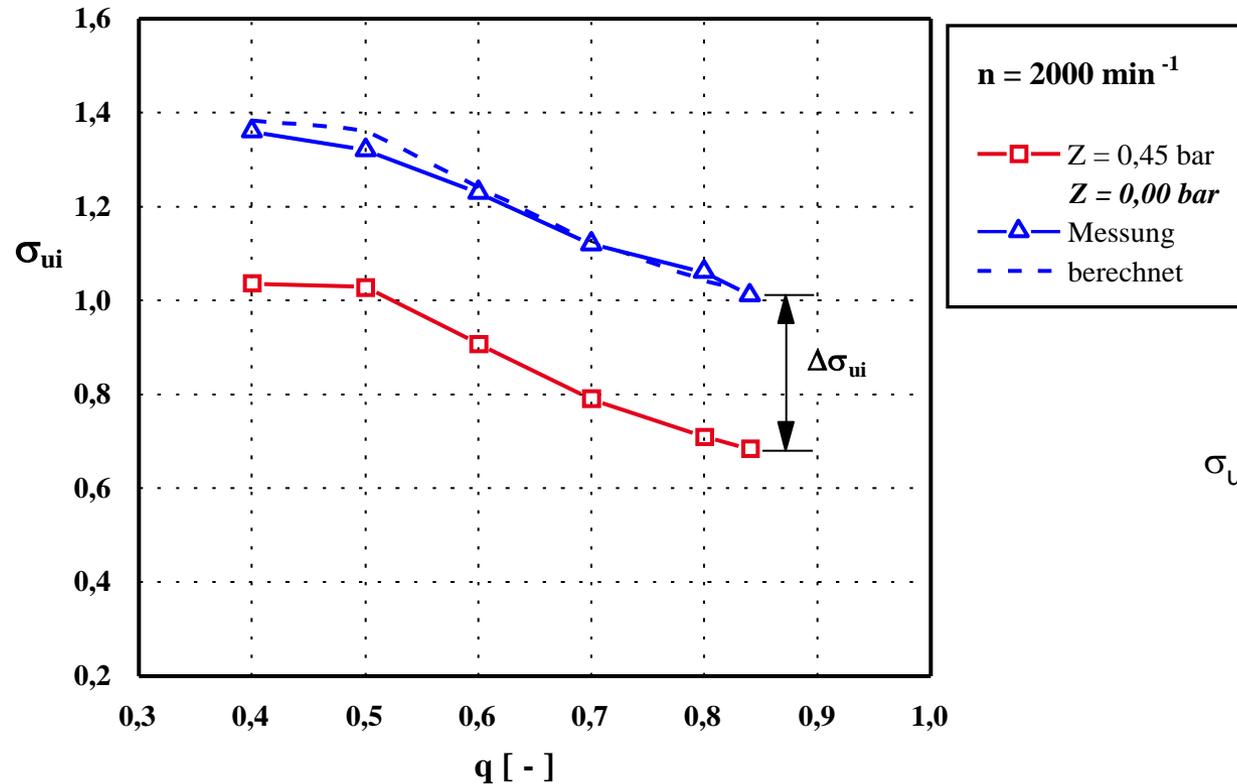
$$\sigma_{u,i} = \frac{p_{\text{tot},0} - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{1,a}^2}$$

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 stochastischer Vorgang)

Akustisch:

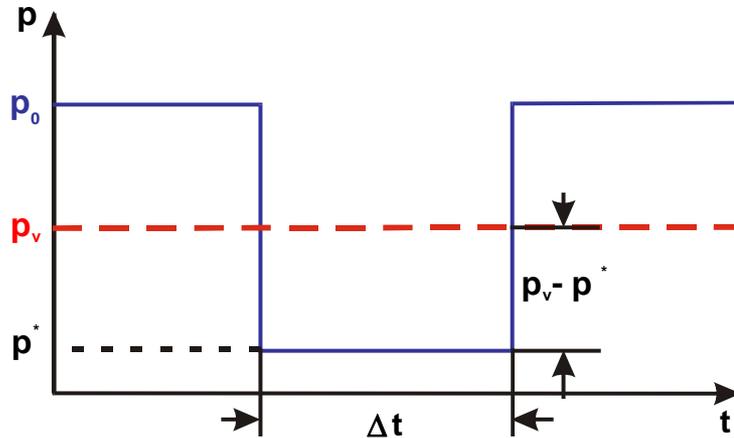
a.) akustische Zugänglichkeit

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

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

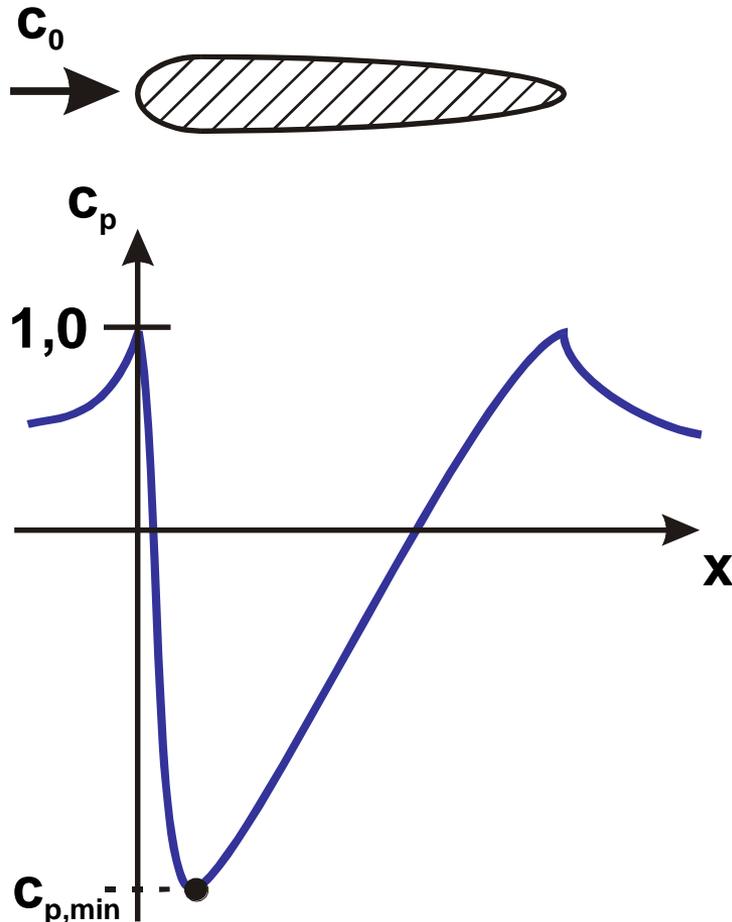
bzw.

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

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

(1/13)

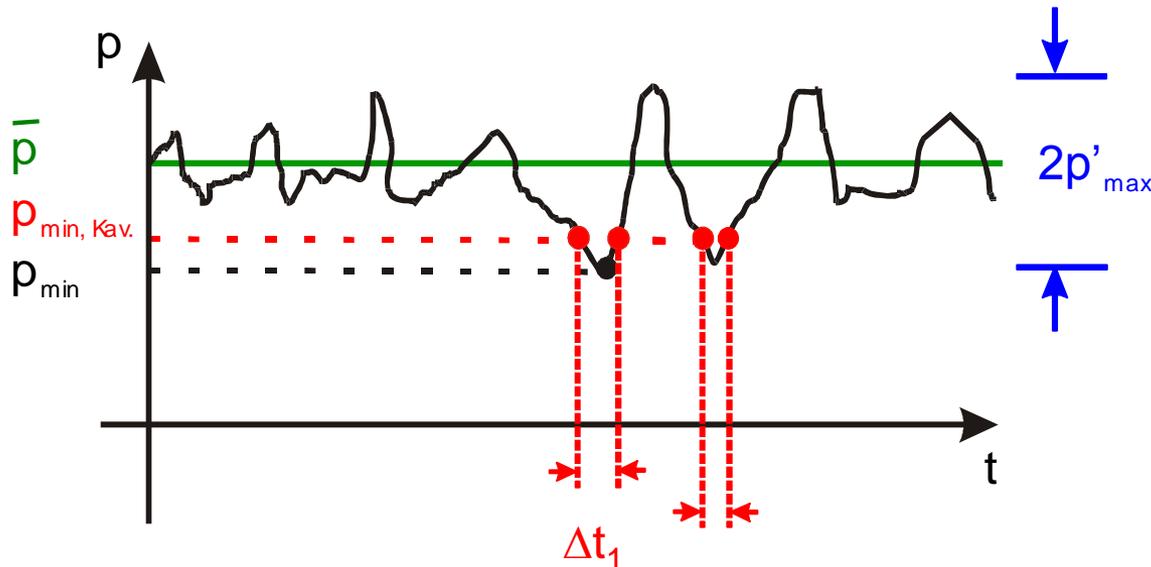


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

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

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

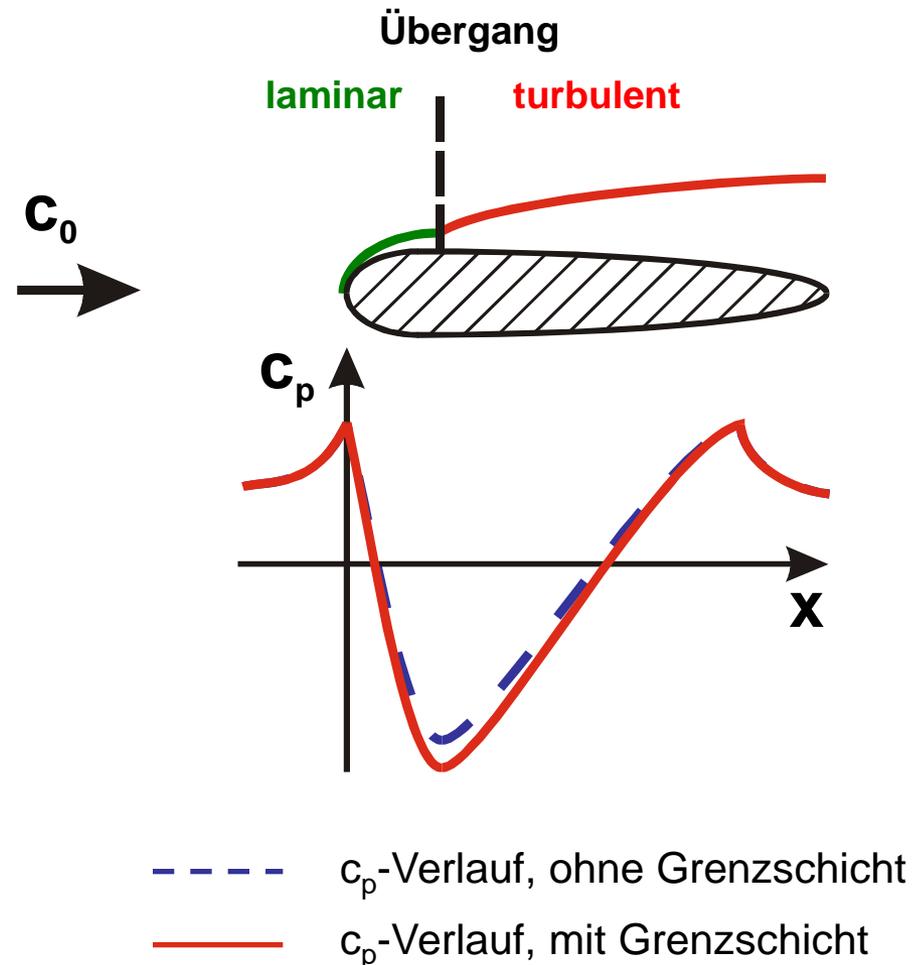
(2/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Grenzschicht ohne Ablösung

- laminare Grenzschicht
- Umschlag
- turbulente Grenzschicht



3.2.4.2 Reibungseffekte - turbulente Grenzschicht

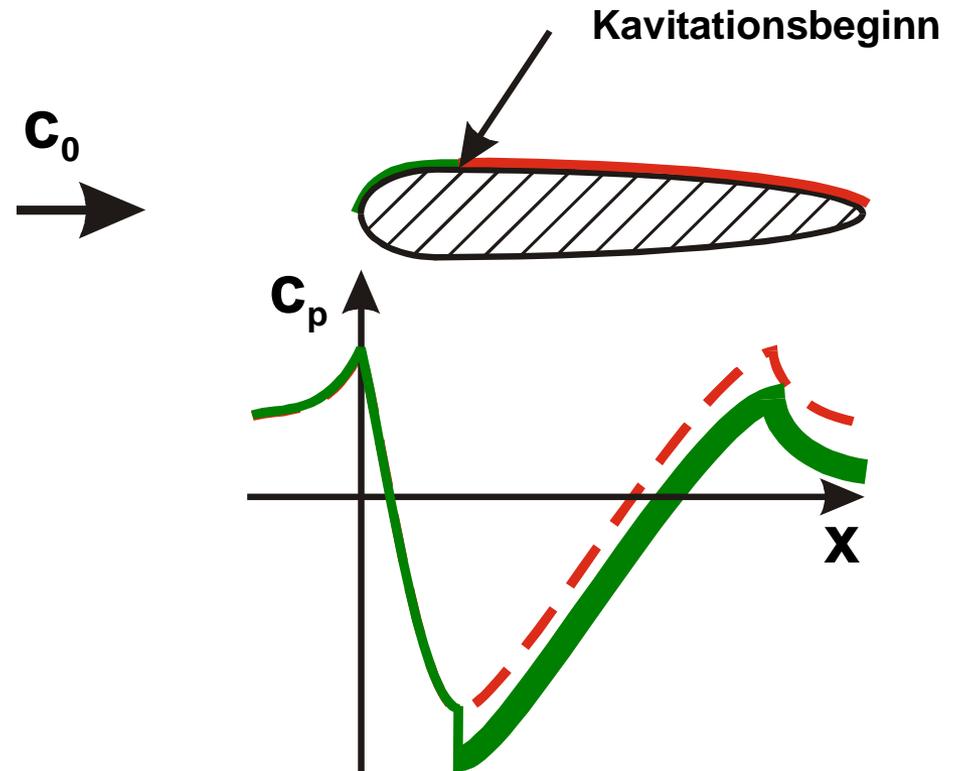
(3/13)



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

(4/13)



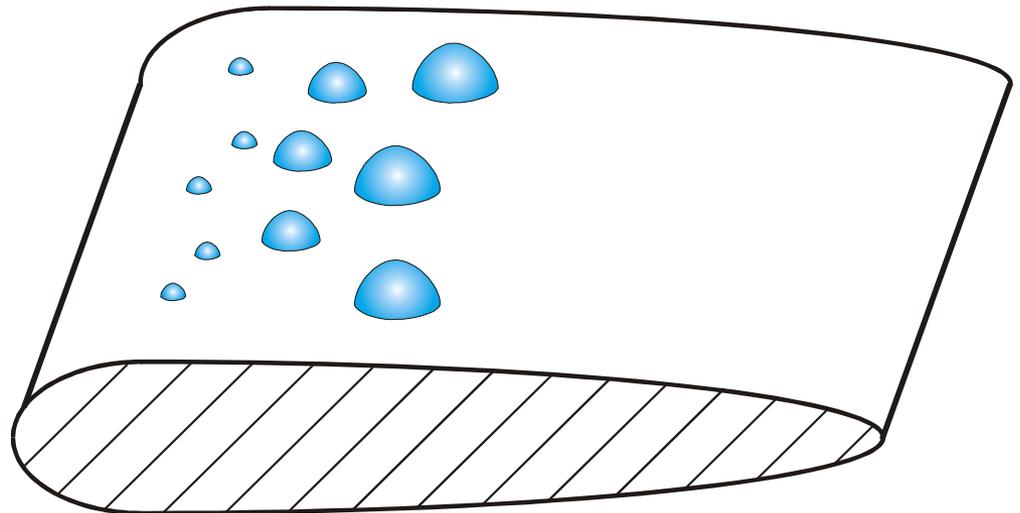
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Typ der Kavitation

Einzelblasen

Einflussfaktoren

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



3.2.4.2 Reibungseffekte - turbulente Grenzschicht

(5/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



3.2.4.2 Reibungseffekte - laminare Ablöseblase

(6/13)



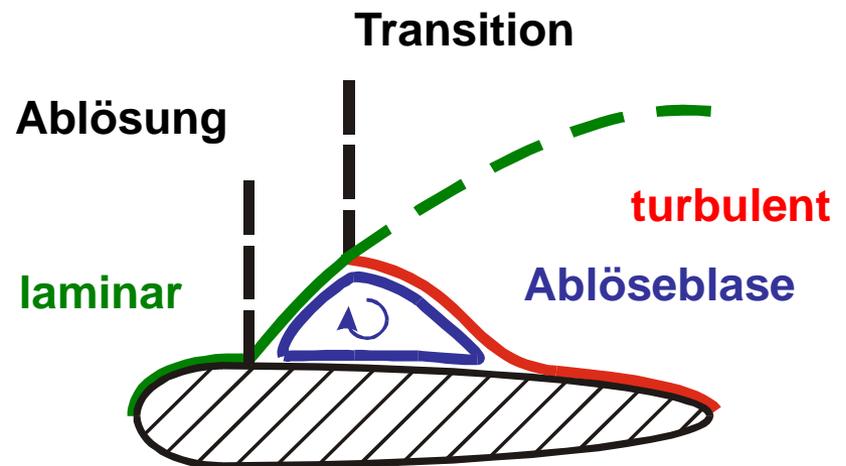
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

(7/13)



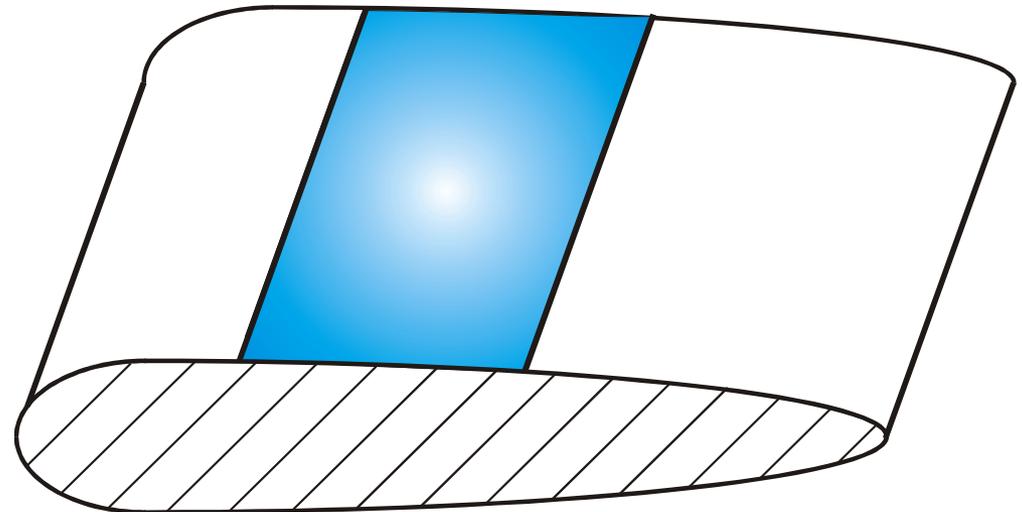
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Typ der Kavitation

Band- oder Ringkavitation (zusammenhängendes Dampfgebiet)

Einflussfaktoren

Ablöseblase nur in begrenztem Reynolds-Bereich



3.2.4.2 Reibungseffekte - frei Scherschichten

(8/13)



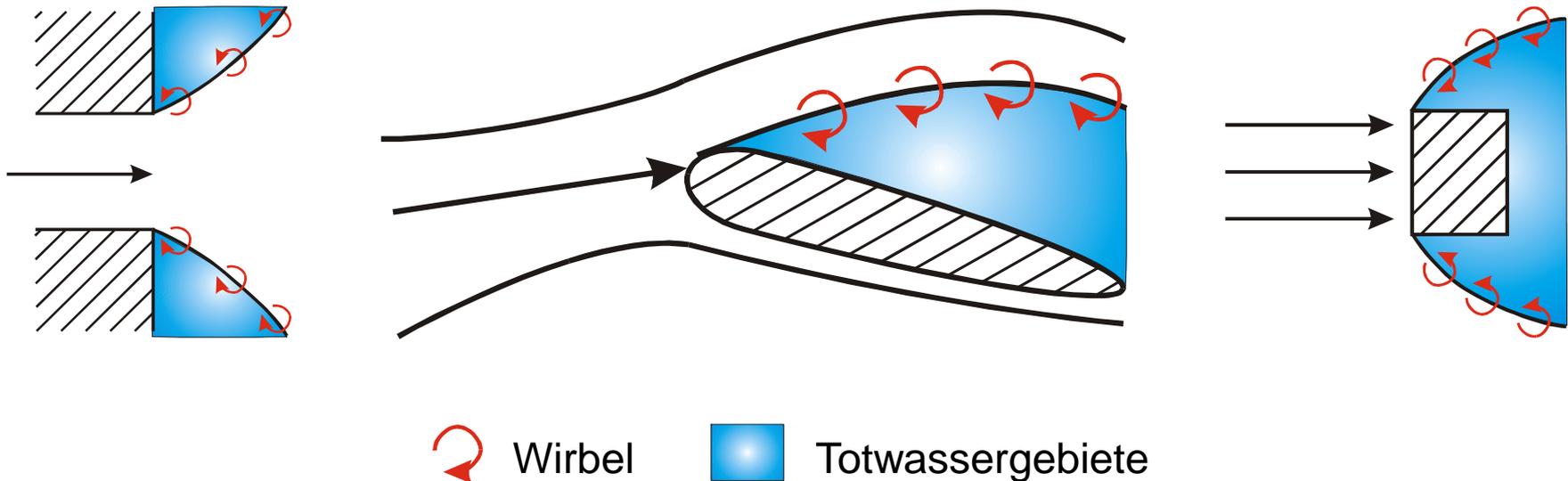
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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)

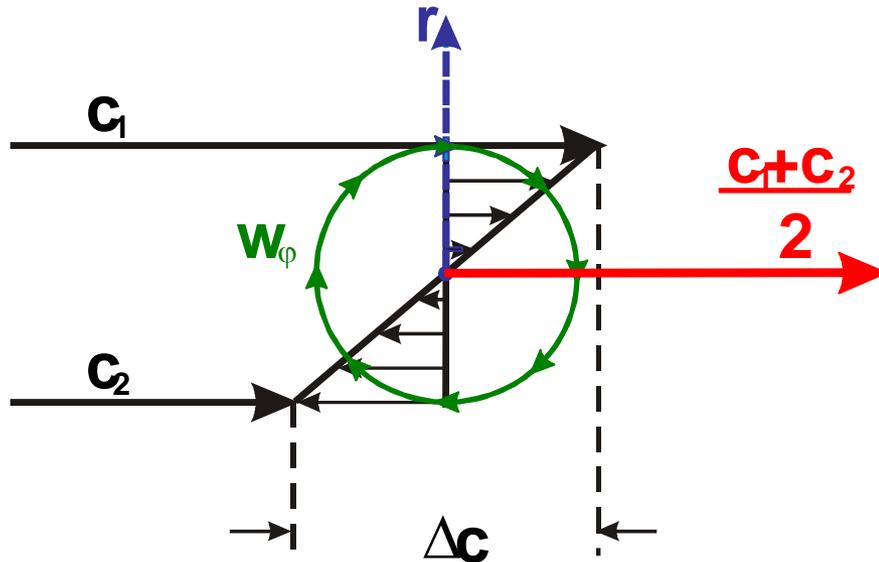


3.2.4.2 Reibungseffekte - frei Scherschichten

(9/13)



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

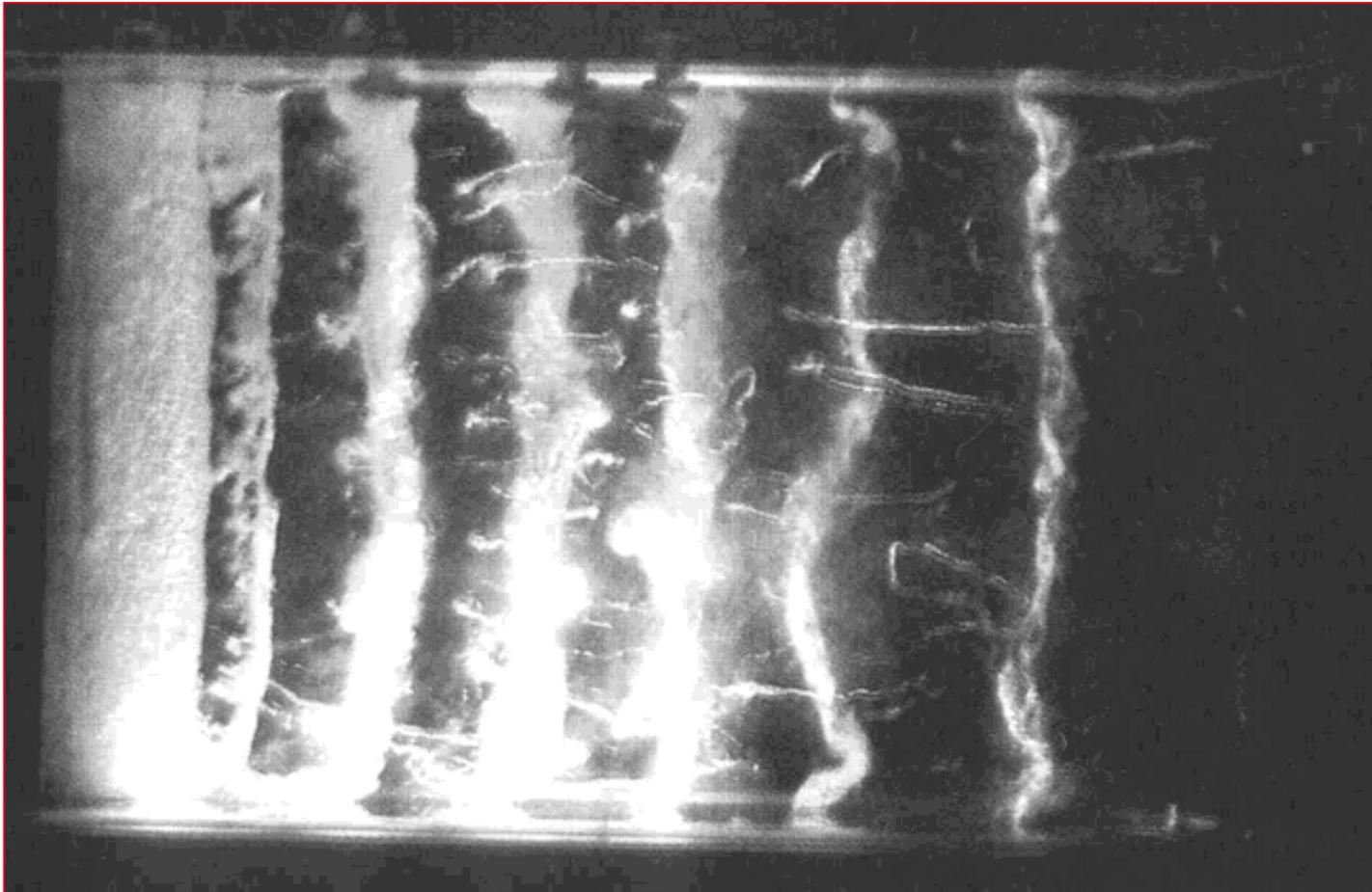
- starker Einfluss des Keimgehaltes
- σ_i steigt mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. Reynoldszahl

3.2.4.2 Reibungseffekte - freie Scherschichten

(10/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

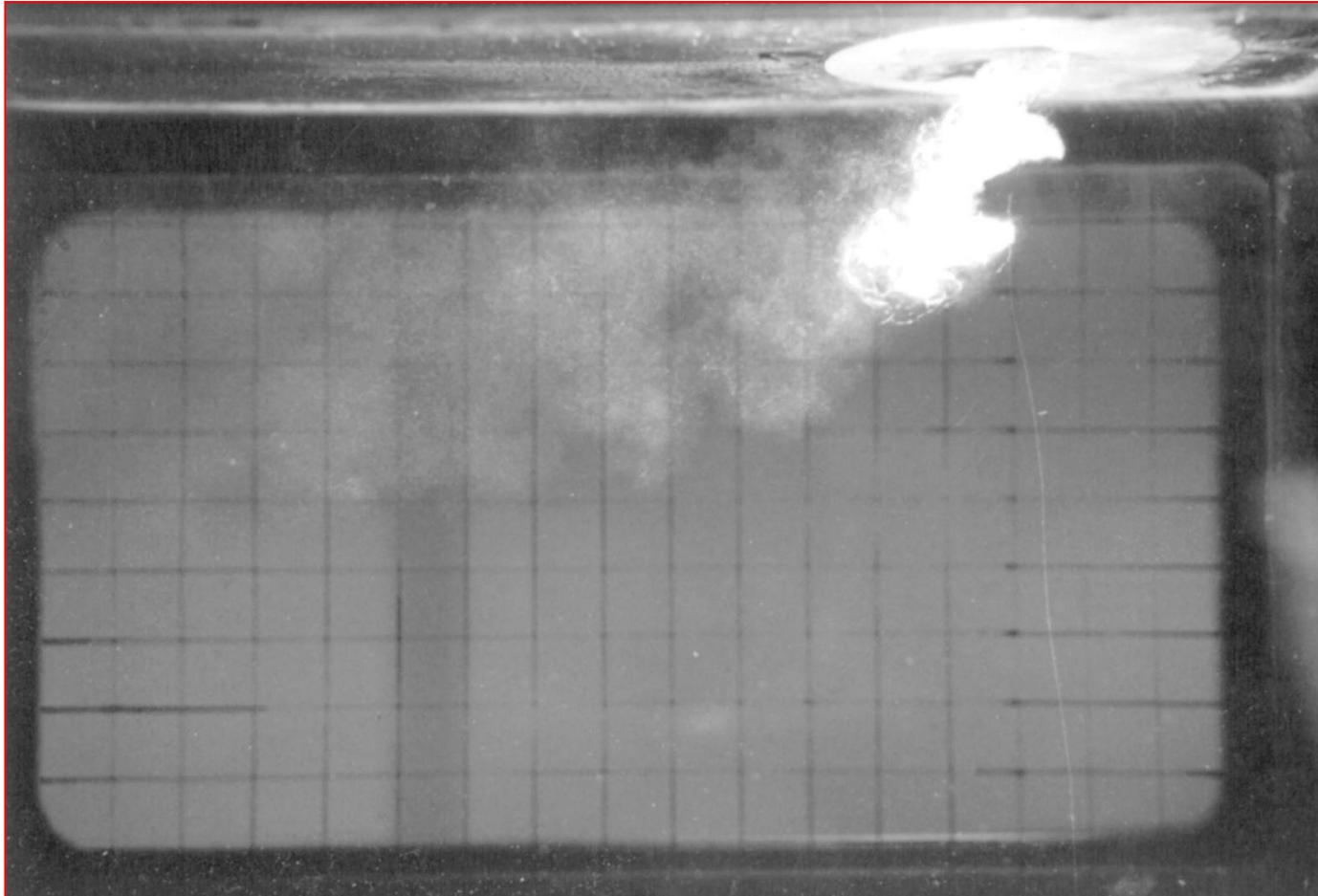


3.2.4.2 Beispiel Reibungseffekte - Strahlvermischungszone

(11/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



3.2.4.2 Reibungseffekte - Rauigkeit

(12/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Arten

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

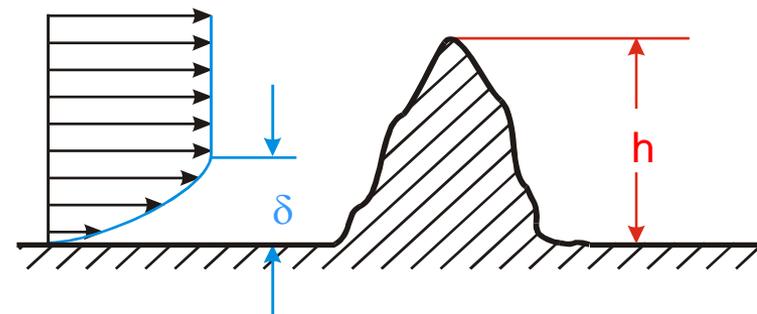
Wirkung



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 - Rauigkeit

(13/13)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ort des Kavitationsbeginns

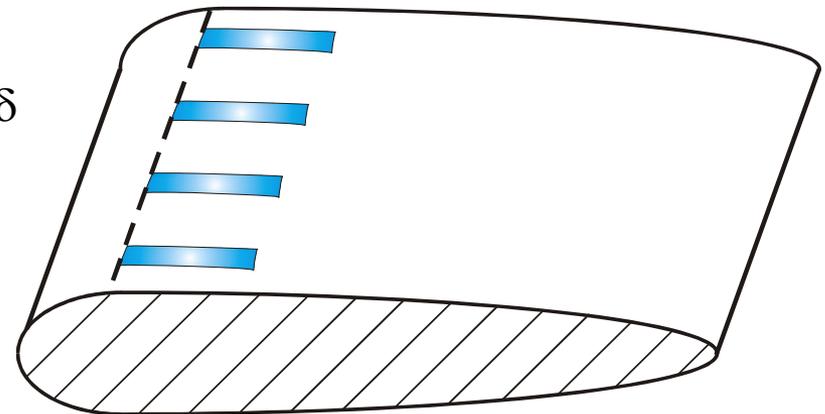
Im Bereich des Minimums von $c_{p, \text{glatt}}$ (Kern der Wirbel)
unmittelbar an den höchsten Rauigkeiten

Typ der Kavitation

Anhaftende Streifen

Einflussfaktoren

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

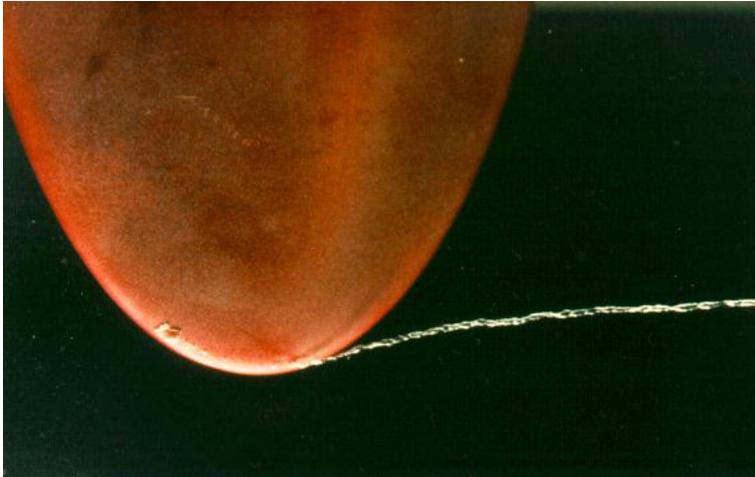


3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss

(1/4)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

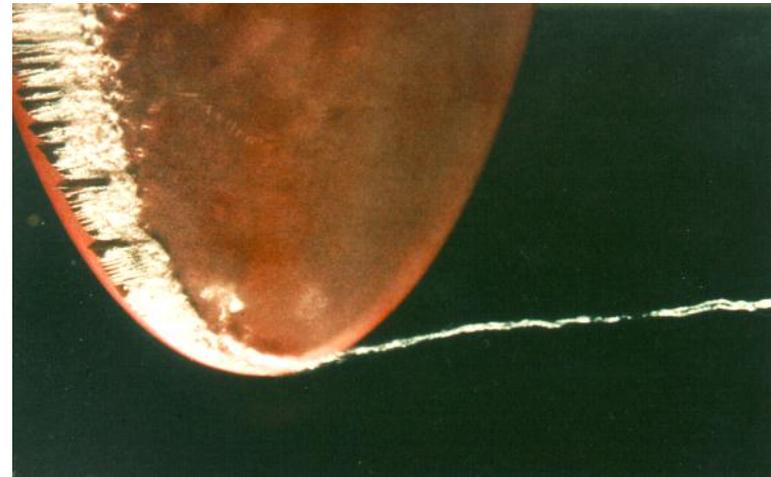


$$c_0 = 5,0 \text{ m/s}$$

$$\sigma = 2,49$$

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

$$\sigma = 2,49$$



3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss

(2/4)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

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:

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

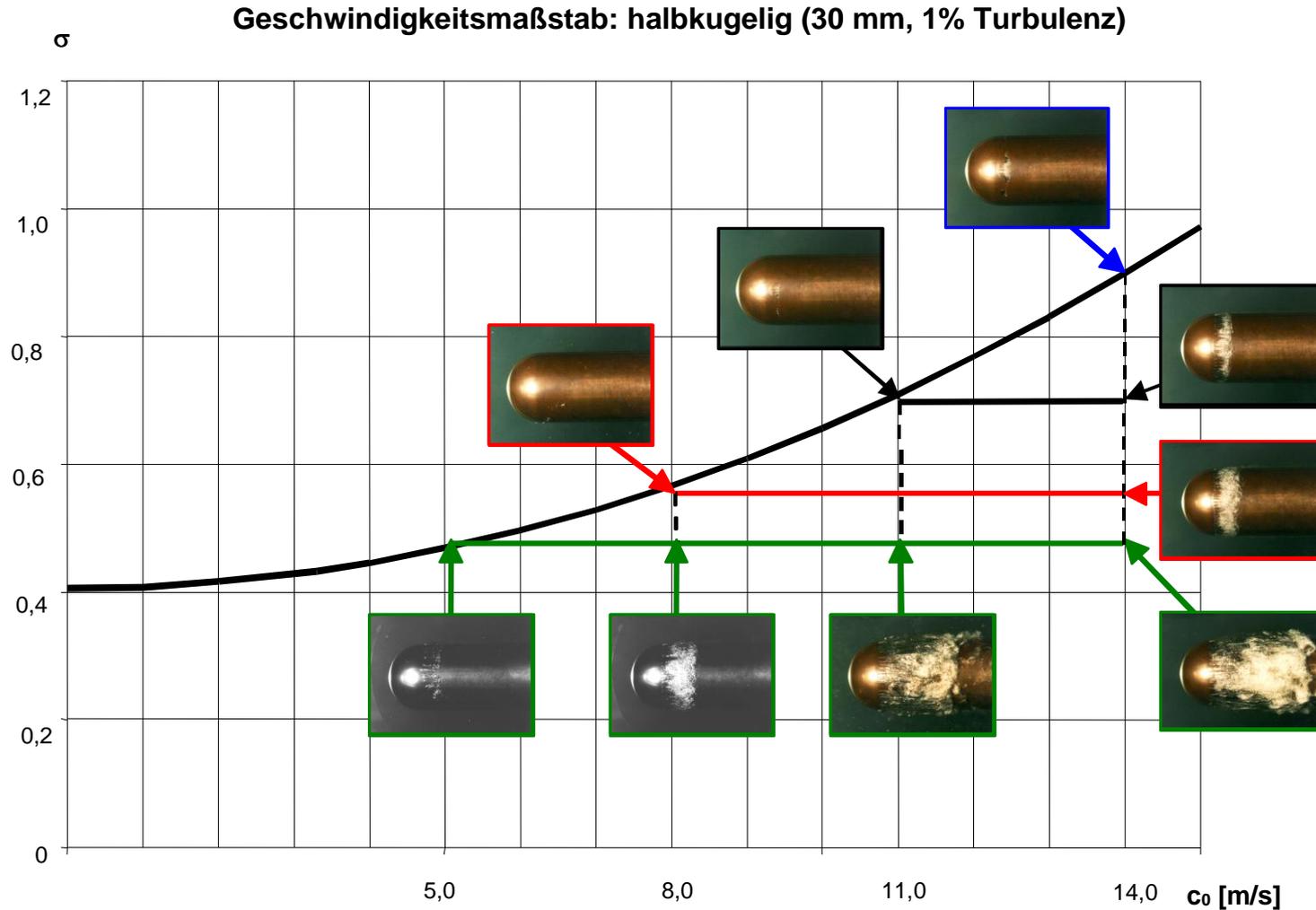
mit:

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

u_{ref} = charakteristische Bezugs-Umfangsgeschwindigkeit

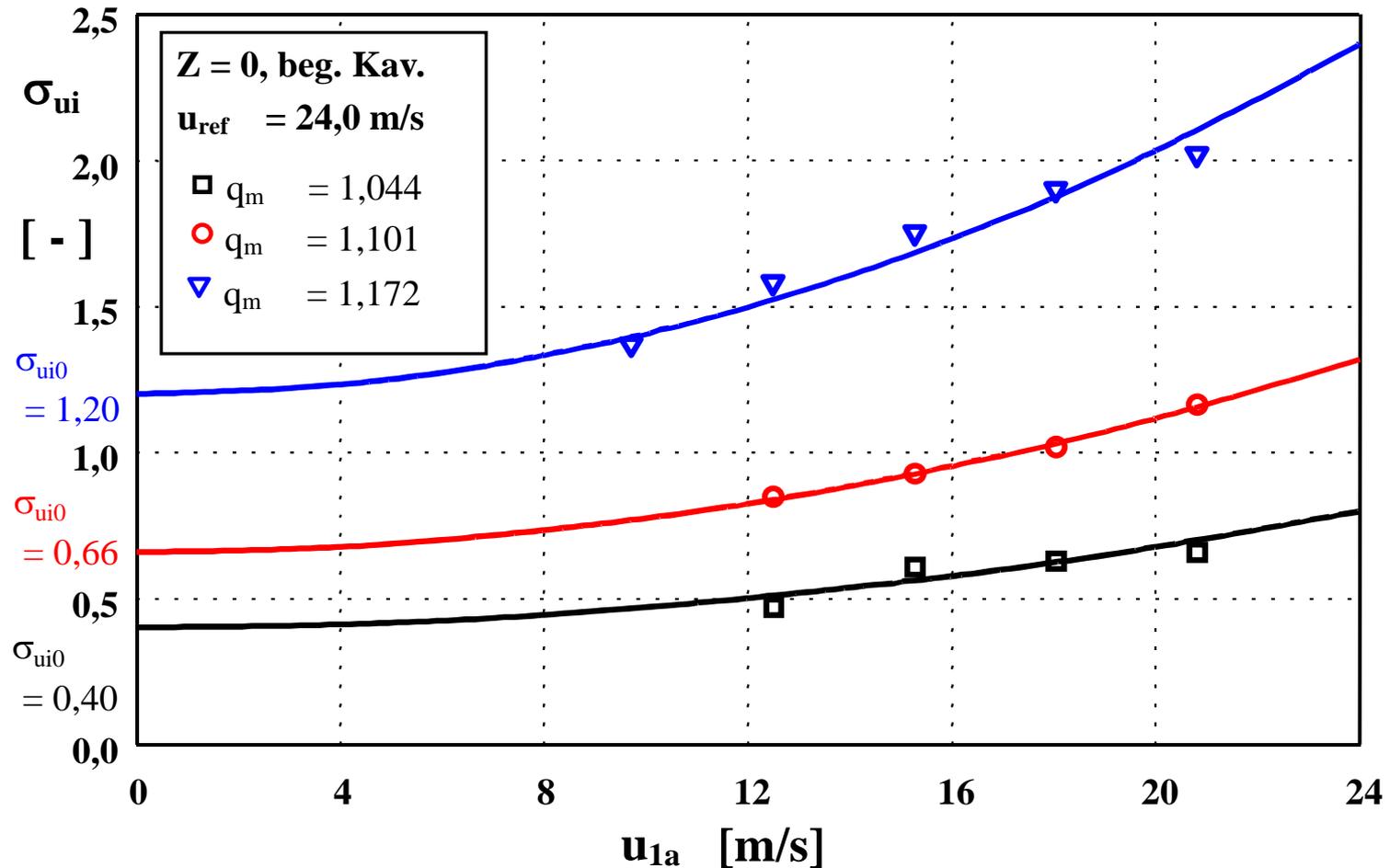
3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss

(3/4)

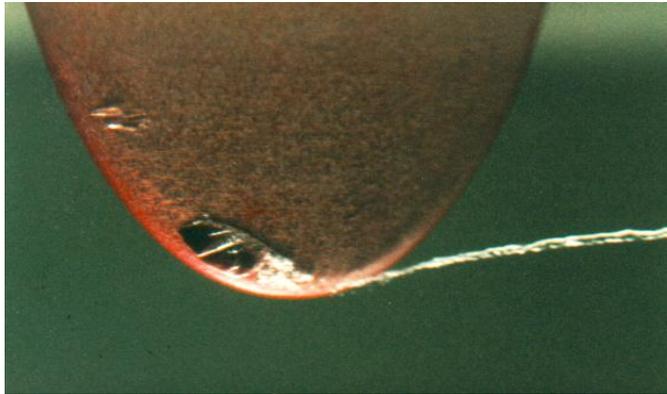


3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss

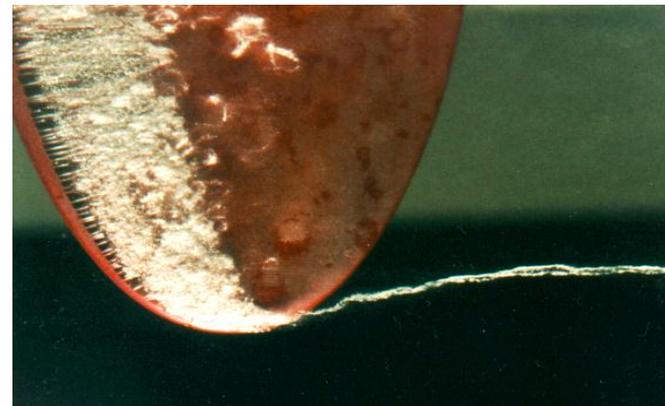
(4/4)



3.3.2 Größeneinfluss



50 mm
 $c_0 = 11,0 \text{ m/s}$
 $\sigma = 2,49$



100 mm
 $c_0 = 11,0 \text{ m/s}$
 $\sigma = 2,49$



200 mm
 $c_0 = 11,0 \text{ m/s}$
 $\sigma = 2,49$

3.3.2 Größeneinfluss

$$\sigma_0 = k \cdot \left(\frac{L}{L_{\text{ref}}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

mit: Referenzlänge L_{ref} = charakteristische Körperabmessung

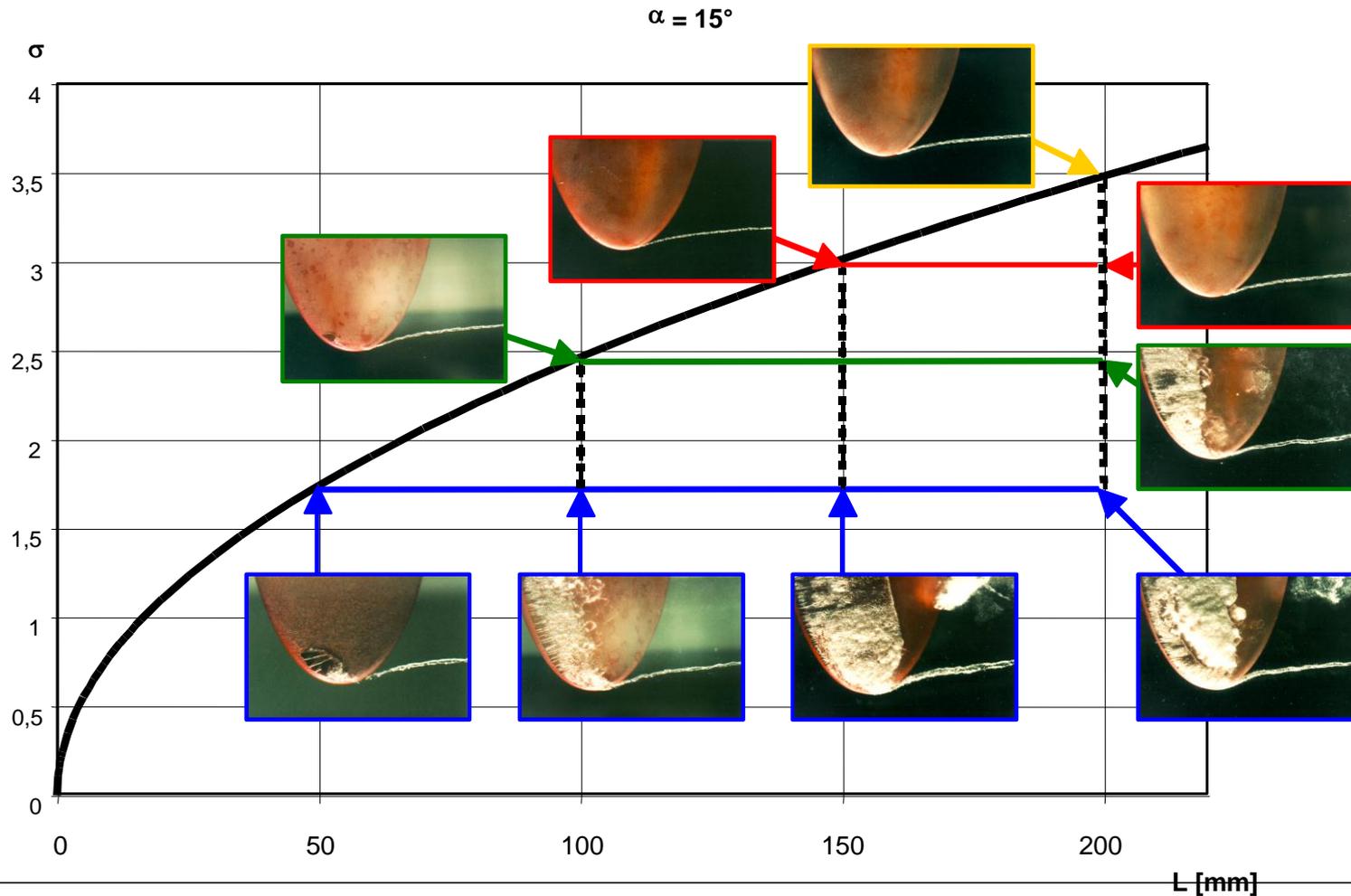
Formparameter k = f(Körperform)

d.h. kleine k-Werte entsprechen
strömungsgünstigen Körperformen;

strömungsungünstige Formen haben
große k-Werte

3.3.2 Größeneinfluss

Größenmaßstab: Tragflügelprofil (8 m/s, 1% Turbulenz)



3.3.3 Einfluss der Turbulenz

Bei gleichen Strömungsgrößen

- wächst die Kavitationszahl für beginnende Kavitation
- entwickelt sich die Kavitation stärker für fortgeschrittene Kavitation

mit zunehmenden Turbulenzgrad der Zuströmung.

Der Einfluss zeigt annähernd lineare Abhängigkeit.

Inhaltsübersicht zum Kapitel 4 „Fortgeschrittene Kavitation“

- 4.1** Begriffe zur fortgeschrittenen Kavitation
- 4.2** Wolkenkavitation („Cloud Cavitation“)
- 4.3** „Fixed Cavity“
- 4.4** Beispiel zur Beeinflussung der fortgeschrittenen Kavitation
- 4.5** Zustände für $\sigma \ll \sigma_i$