

Inhaltsübersicht zum Kapitel 5 „Auswirkungen der Kavitation“



5.1 Schallakustische Auswirkung

5.2 Rückwirkung auf die Strömung

5.2.1 Innenströmung

5.2.2 Außenströmung

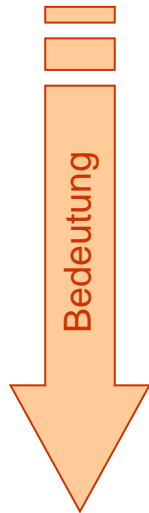
5.3 Kavitations-Erosion

5.3.1 Wirkungsmechanismus der erosiven Aggressivität von Kavitation

5.3.2 Messmethoden

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen

5.1 Auswirkungen der Kavitation



- Erzeugung von Schallsignalen
- Veränderung des Strömungsfeldes
- Werkstoffzerstörung



Kavitationsinduzierte Schallsignale

Blasenimplosion

Verschiedene Wechselwirkungen der Blasen:

- Wolken
- Hufeisenwirbel

Geometrie der Dampfvolumina nicht unbedingt kugelförmig



Flüssigkeitsschall

impulsförmig



Körperschall

Vibrationen



Luftschall

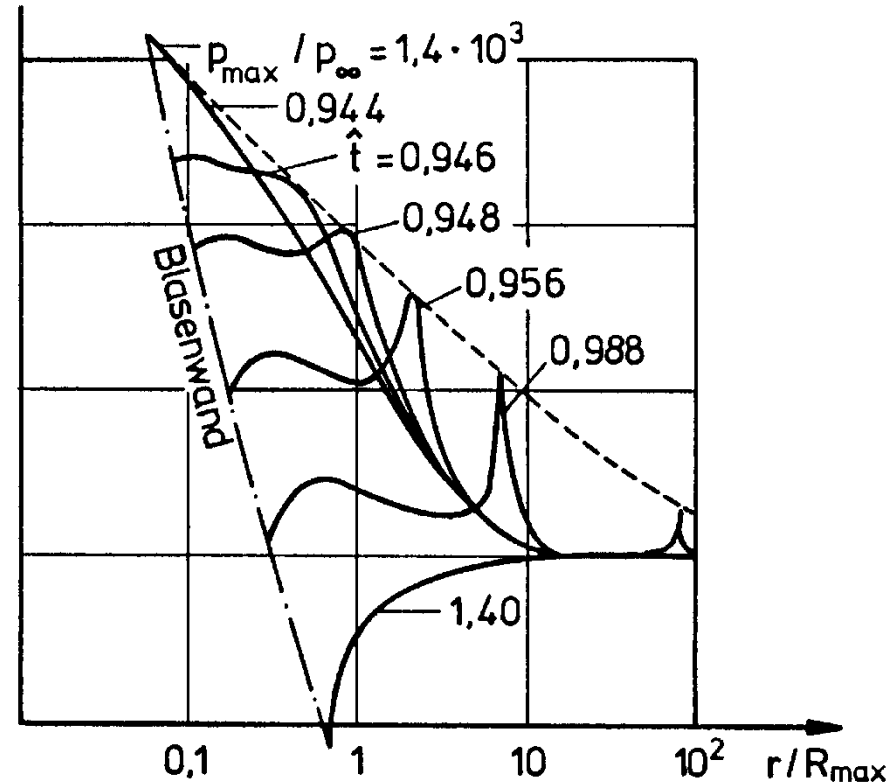
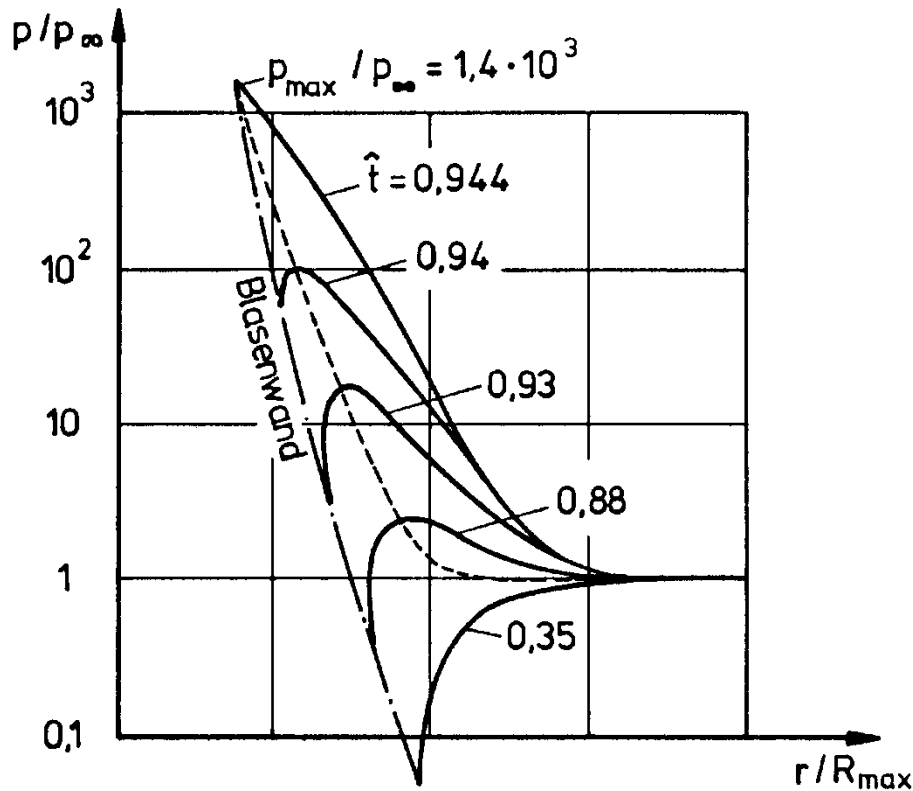
Hohe Geschwindigkeit geht mit hohem Exponenten in Schallintensität und erosive Aggressivität ein.



Schallemission

5.1 Schallakustische Auswirkungen

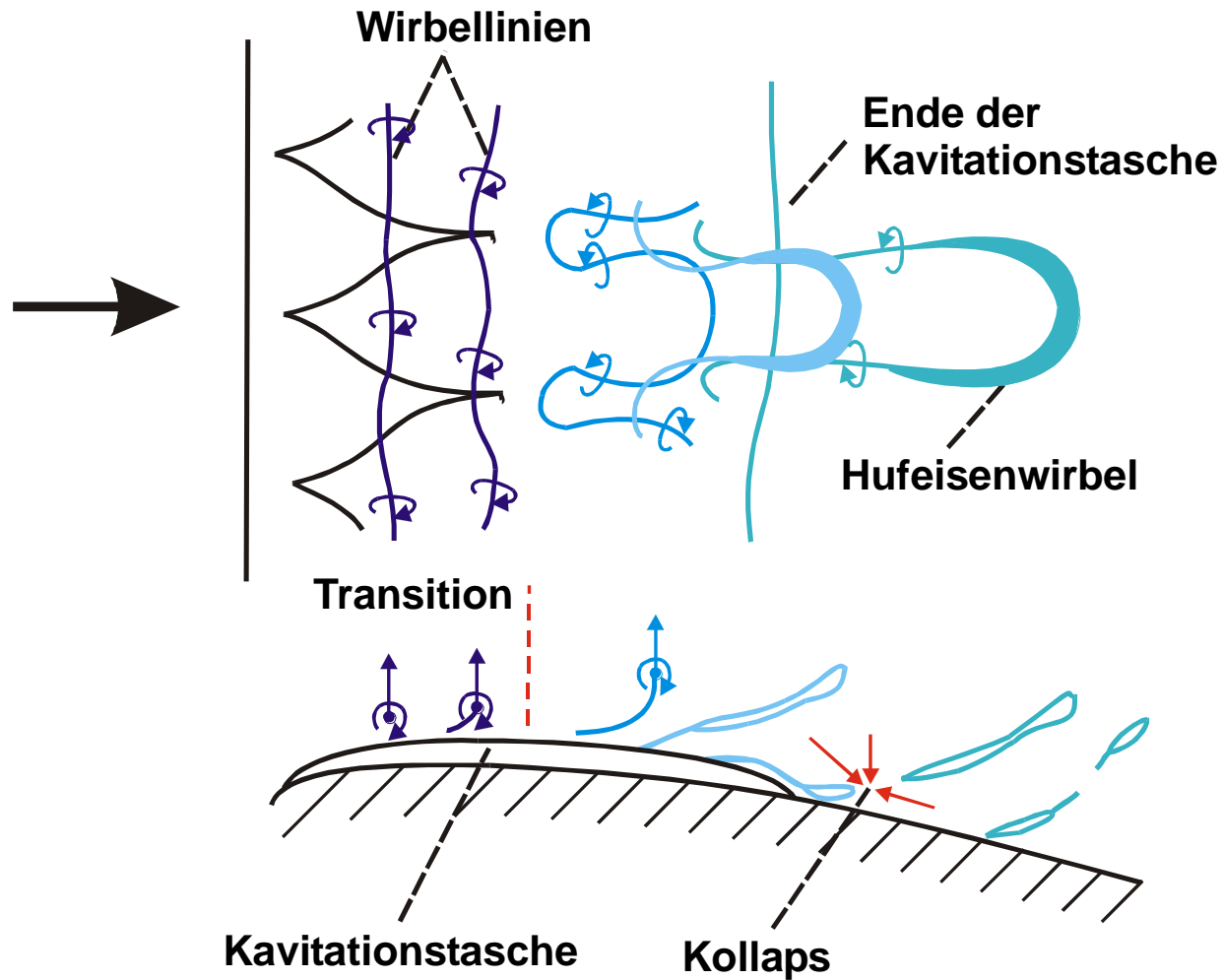
(2/11)



$p_{\infty} = 0,703 \text{ bar}, \vartheta_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, p_{G,A} = 0,007 \text{ bar}, R_{\text{max}} = 1 \text{ mm}$

5.1 Schallakustische Auswirkungen

(3/11)





Einflüsse auf Entstehung

- Strömungsfeld
- Blasendynamik
- Kavitationstyp
- Kavitationsausmaß

Einflüsse auf Übertragung

- Dämpfung Energiedissipation insbesondere durch Streuvorgänge an anderen Blasen
 ⇒ Bestimmung der „void fraction“ aus der Änderung der Schallgeschwindigkeit
- Reflexionen ⇒ Bestimmung des Reflexionsanteils aus der Änderung der Sekundärpulse
- Resonanzen



Praktische Bedeutung

- Geräuschemission
- akustische Erfassung (Beginn; Eigenschaften; Intensität)

Signale

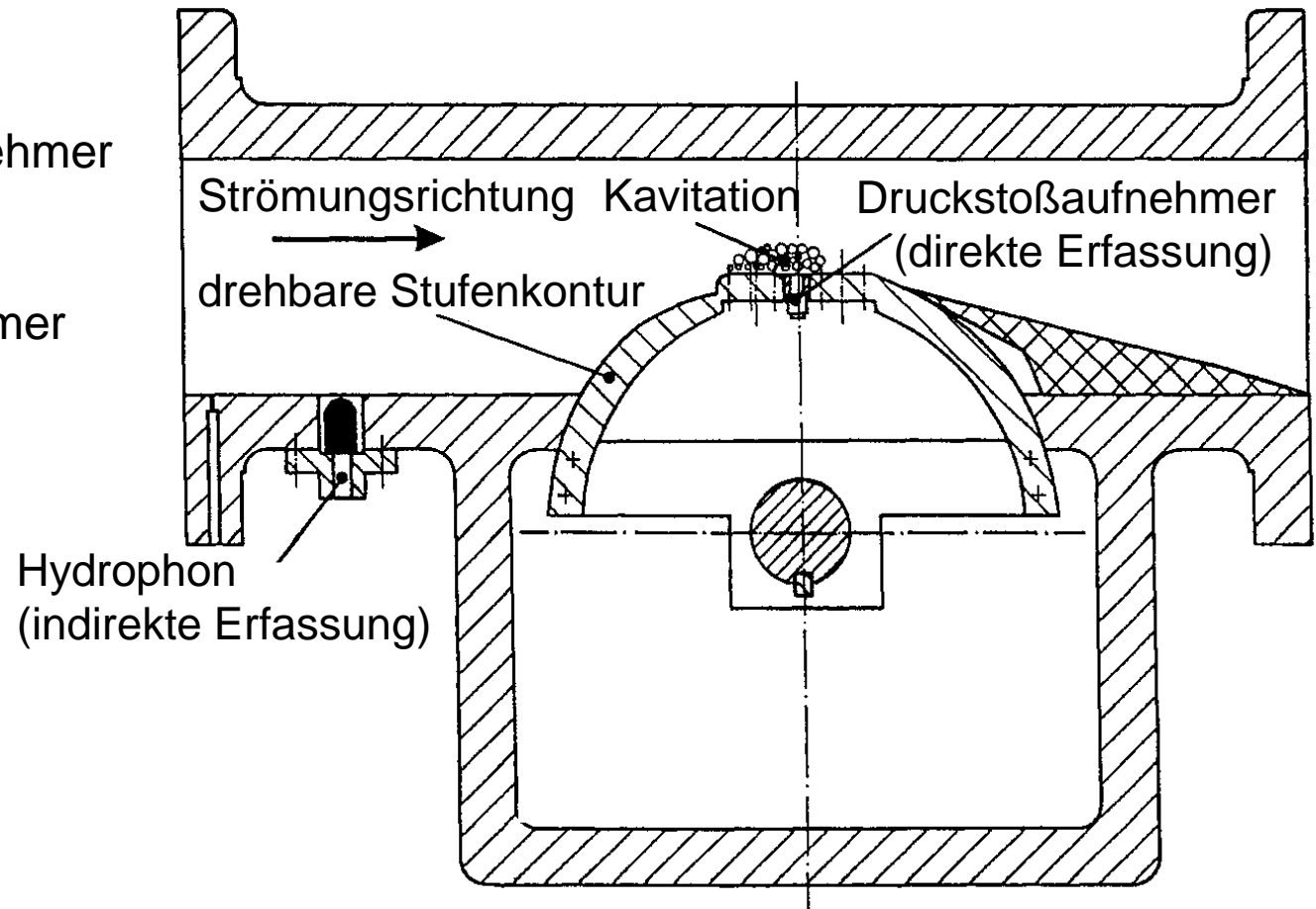
stochastisch, impulsartig

Frequenzgehalt

- Blasenschwingung („rebound“) → f_e
- instationäre Kavitation → f_{Zyklus}
- Form der Einzelimpulse $f_0 \rightarrow \frac{1}{t_a}$; $E \sim f^{-2}$ (breitbandig)

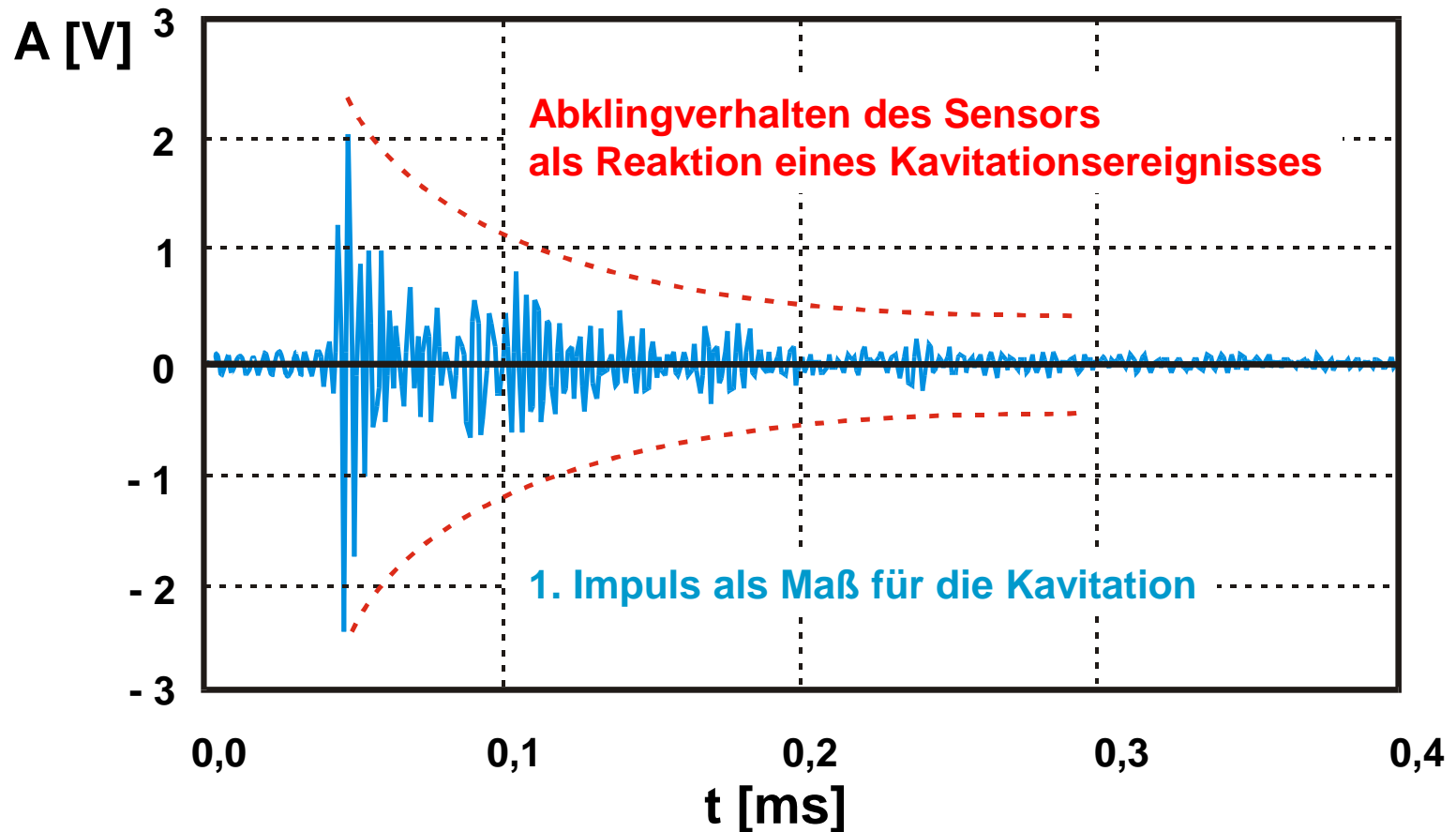
Aufnahme

- Hydrophon
- Körperschallaufnehmer
- Mikrophon
- Druckstoßaufnehmer





Direkte Messung - Druckstoßaufnehmer



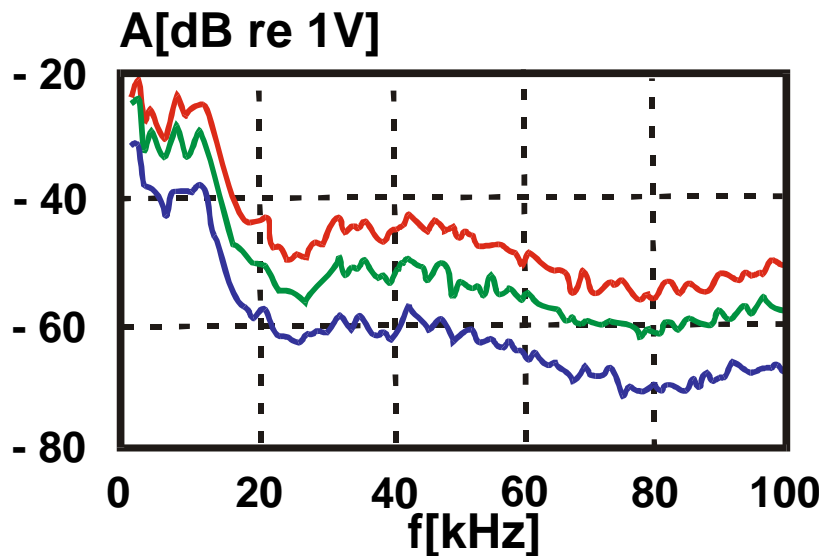
5.1 Schallakustische Auswirkungen

(8/11)



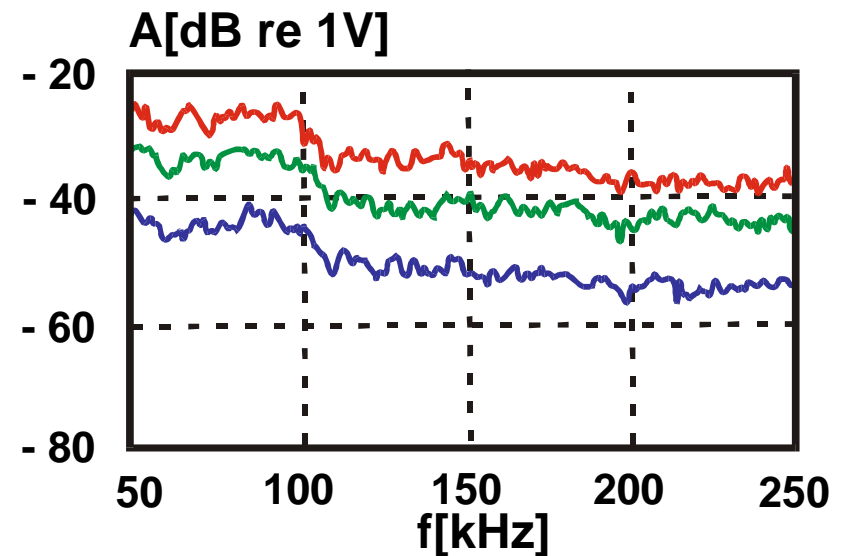
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fernfeldmessungen - Variation der Geschwindigkeit



Hydrophon

- $c_0 = 6 \text{ m/s}$
- $c_0 = 8 \text{ m/s}$
- $c_0 = 10 \text{ m/s}$



Körperschallaufnehmer

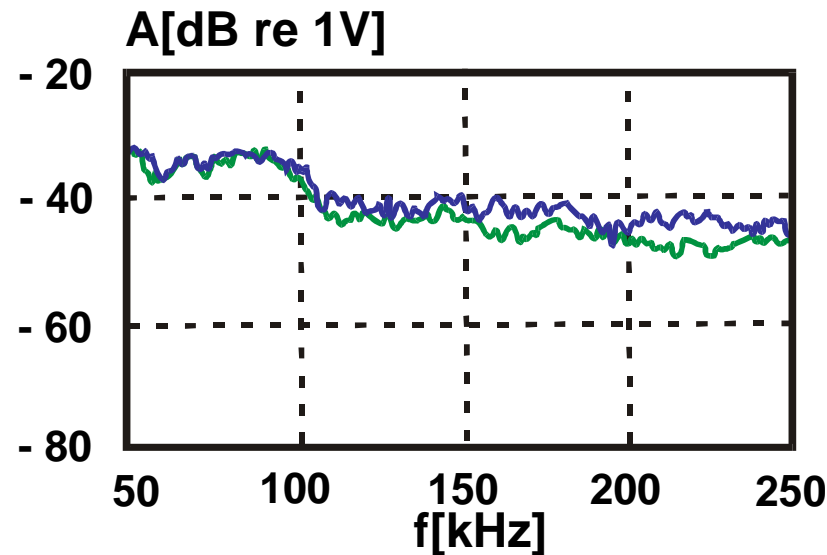
Fazit

Mit Geschwindigkeit wird Amplitude höher;
charakteristischer Verlauf ist gleich.

Jedoch Sensorabhängigkeit.



Fernfeldmessungen - Variation der Kavitationszonen-Länge



Körperschallaufnehmer

- $L_c/L_r = 0,25$
- $L_c/L_r = 0,50$

Fazit

Verlauf praktisch unabhängig von der Kavitationszonen-Länge.

Jedoch Sensorabhängigkeit.

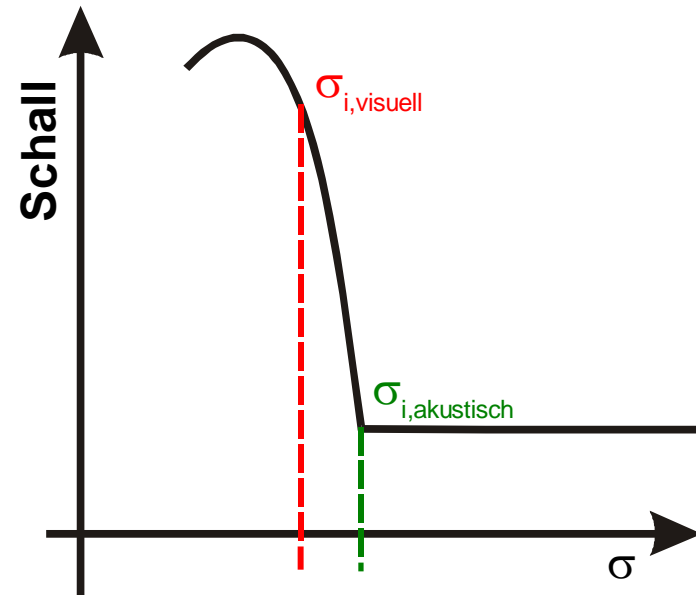


Signalverarbeitung

- Filterung (Hochpass ~ 40 kHz) und Effektivwert
- Frequenzspektrum
- Impulshöhenanalyse

Vorteile der akustischen Erfassung

- hohe Empfindlichkeit ($\sigma_i!$)
- keine Abänderungen am Messobjekt



Gründe für Maximum:

- abnehmende Impulsenergie
- zunehmende Dämpfung der Ausbreitung



Ziele aktueller Forschung

- Identifikation
- Korrelation mit Kavitationserosion
- Erarbeitung von Grenzwerten für zulässige Kavitation

5.2 Rückwirkung auf die Strömung

Art der Strömung

- Innenströmung
- Außenströmung

} mit/ohne Ablösung

Stadium der Kavitation

- beginnende bzw. schwache
- fortgeschrittene
- Voll-/Super-

} Kavitation

5.2.1 Innenströmung

(1/7)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

$$\zeta = \frac{2y_v}{c^2}$$

mit: y_v = spezifischer Energieverlust

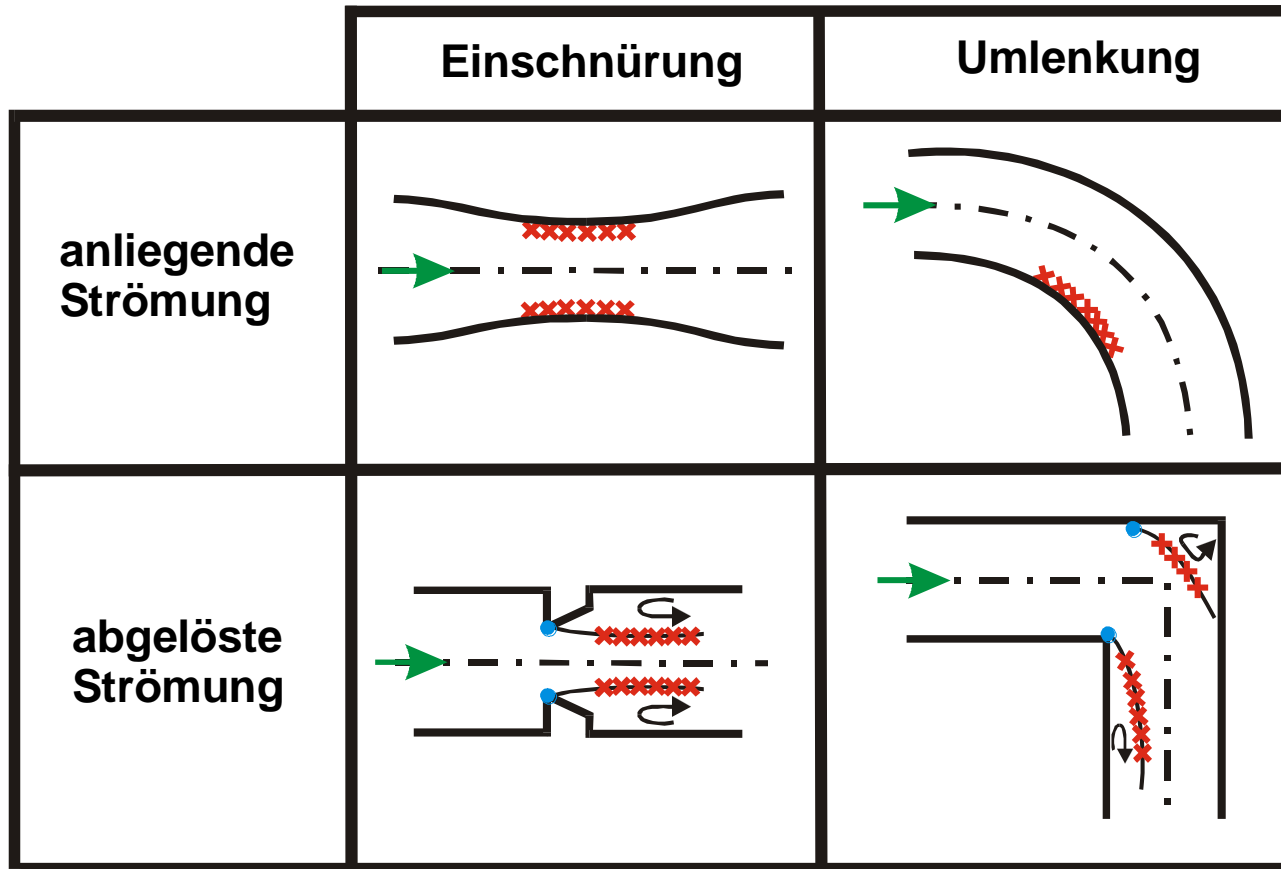
ζ = Druckverlustziffer = f(Geometrie)

c = mittlere Geschwindigkeit = $\bar{c} = \frac{\dot{V}}{A}$

Verluste durch

- Wandreibung (äußere Reibung)
- Verwirbelung/Vermischung nach Ablösung (innere Reibung)

5.2.1 Innenströmung



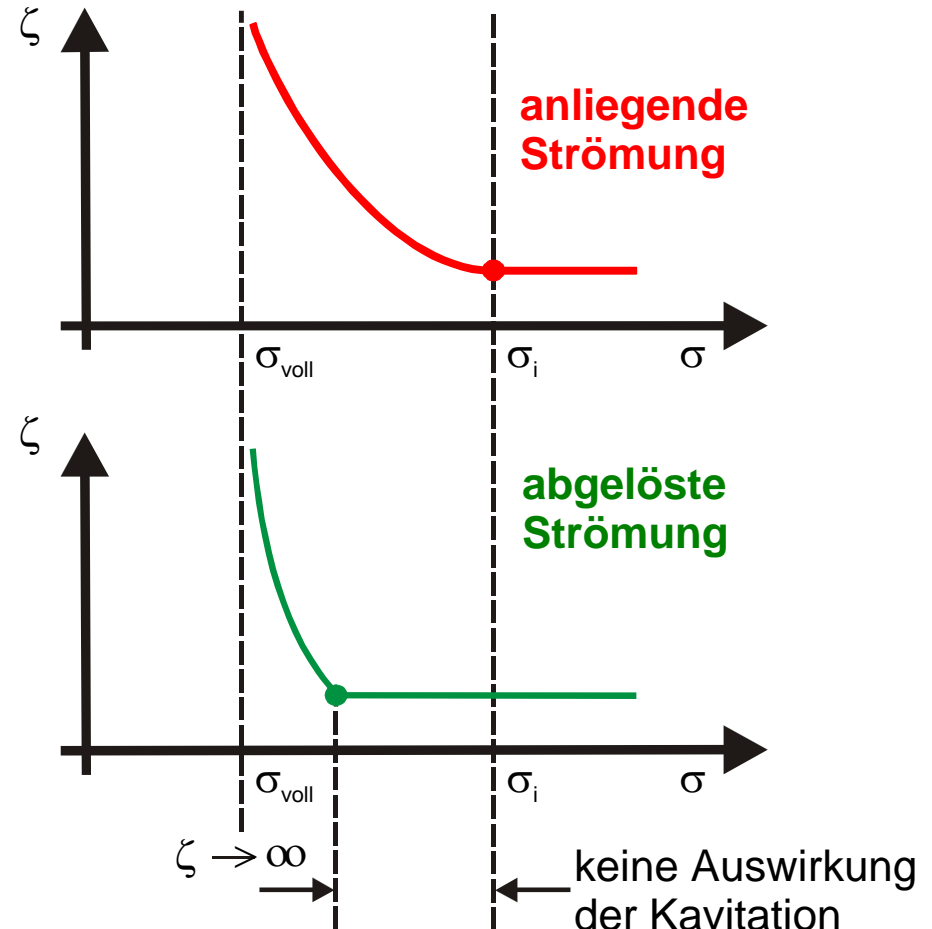
✘ Kavitationsgefahr

● Ablösung

5.2.1 Innenströmung

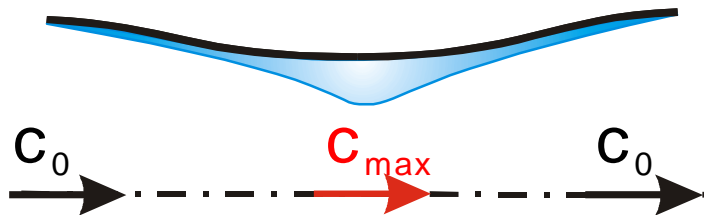
Für $\sigma \leq \sigma_i$

$\zeta =$ f(Geometrie,
Rauigkeit (K/L),
Reynoldszahl,
Fortschrittsgrad der
Kavitation (σ -Wert))



5.2.1 Innenströmung

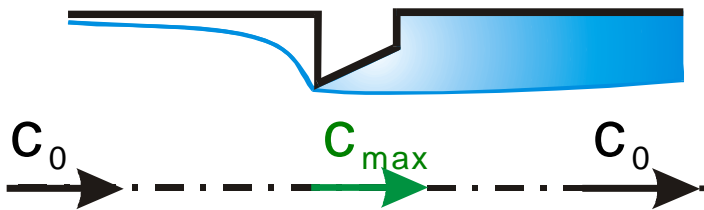
Venturidüse (anliegende Strömung)



- zunehmende Verringerung des Strömungsquerschnittes
- Vergrößerung von Δc
- größere dissipative Wirkung

Gelegentlich macht sich ein gegenläufiger Effekt, die Verringerung der Wandreibung, bei beginnender Kavitation bemerkbar.

Blende (abgelöste Strömung)



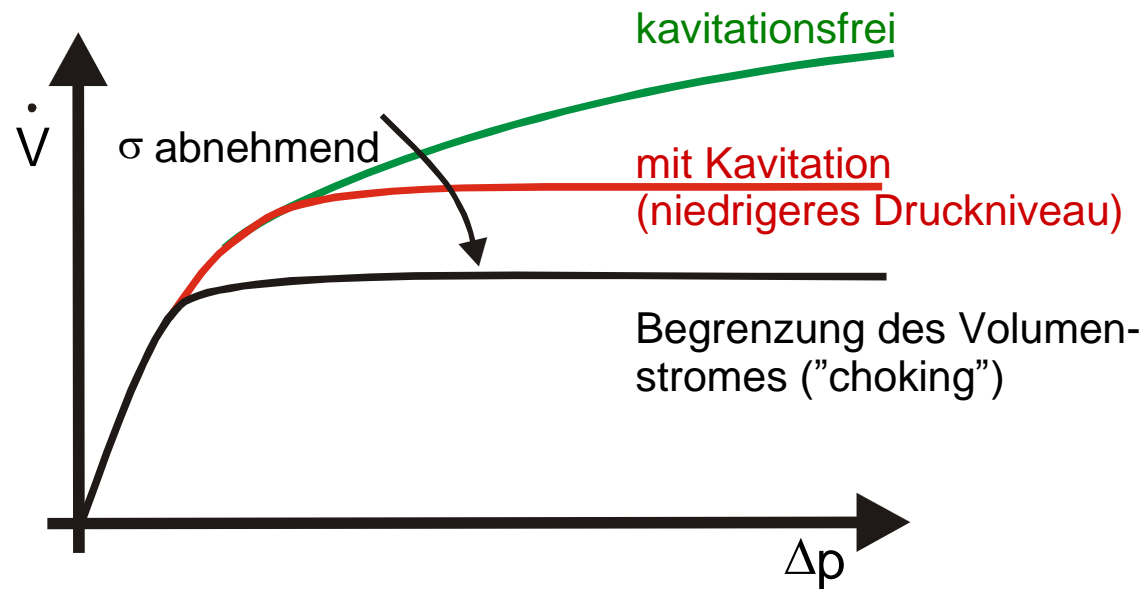
- Keine Behinderung der Strömung, solange das Dampfgebiet auf das Ablösegebiet beschränkt bleibt.

5.2.1 Innenströmung

(5/7)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



$$\left. \begin{array}{l} \frac{c_{\max}}{c_0} = \text{const} \\ p_{\min} = p_v \end{array} \right\} \text{in der "vena contracta"}$$

5.2.1 Innenströmung

Zur Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

$$a = \sqrt{\frac{E_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}}} \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{E_{\text{Fl}}} \Delta p$$

Wasser (20°C): $E_{\text{Fl}} = 2 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

$$a_{\text{Fl}} = 1450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

in Flüssigkeits-/Gas-Gemischen („void fraction“)

$$1.) \quad \alpha = \frac{V_{\text{Gas}}}{V_{\text{Gas}} + V_{\text{Fl}}} \rightarrow \frac{1}{E_{\text{m}}} = \frac{\alpha}{E_{\text{Gas}}} + \frac{1-\alpha}{E_{\text{Fl}}}$$

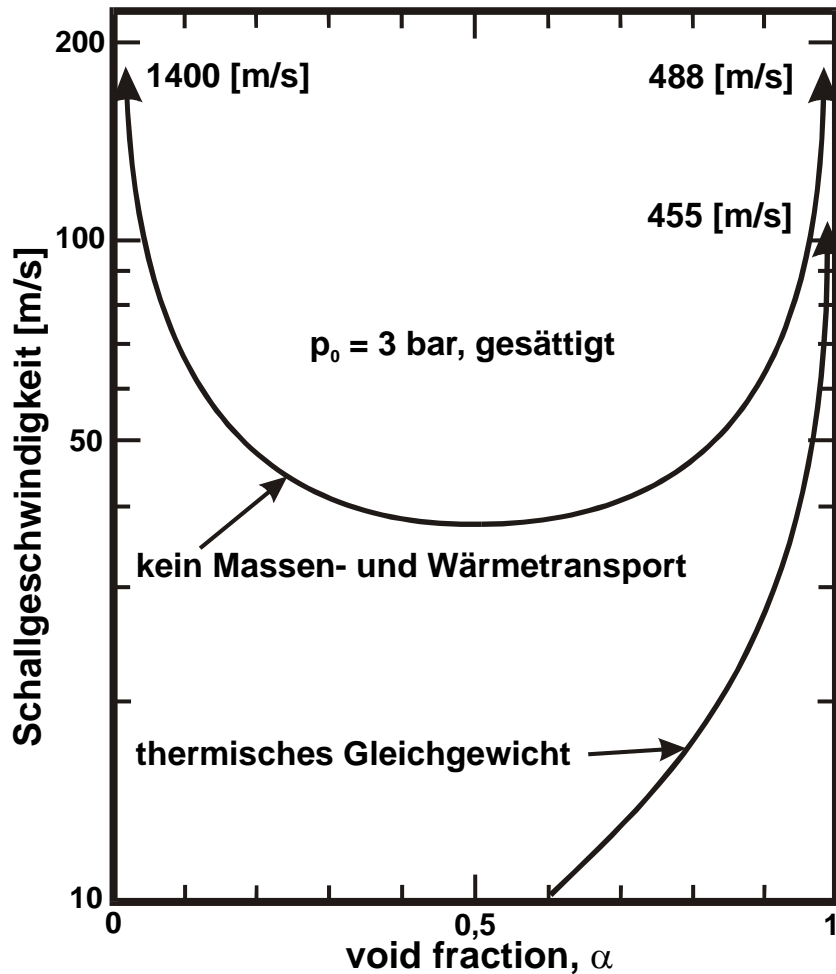
$$2.) \quad \text{für } E_{\text{Fl}} \gg E_{\text{Gas}} : E_{\text{m}} \approx \frac{E_{\text{Gas}}}{\alpha} \approx \frac{p}{\alpha} \quad (\text{ideales Gas})$$

$$\rho_{\text{m}} = \alpha \rho_{\text{Gas}} + (1-\alpha) \rho_{\text{Fl}}$$

$$\text{für } \rho_{\text{Fl}} \gg \rho_{\text{Gas}} : \rho_{\text{m}} = (1-\alpha) \rho_{\text{Fl}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{a_{\text{m}}} = \sqrt{\frac{(1-\alpha)^2}{a_{\text{Fl}}^2} + \frac{\alpha^2}{a_{\text{Gas}}^2} + \frac{\alpha(1-\alpha)\rho_{\text{Fl}}}{p}}$$

5.2.1 Innenströmung



Gase

$$a = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad a (\text{Luft, } 20^\circ\text{C}) = 340 \text{ m/s}$$

Flüssigkeit

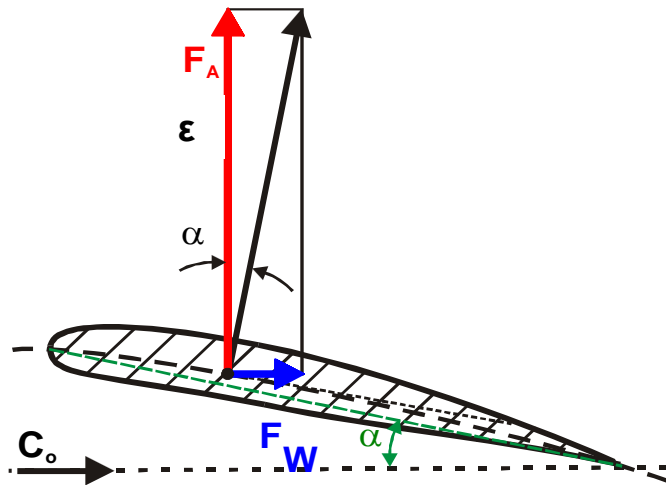
$$a = \sqrt{\frac{E_{\text{Fl}}}{\rho_{\text{Fl}}}} \quad a (\text{H}_2\text{O, } 20^\circ\text{C}) = 1450 \text{ m/s}$$

Gemisch

$$\frac{1}{a_m} = \sqrt{\frac{(1-\alpha)^2}{a_{\text{Fl}}^2} + \frac{\alpha^2}{a_{\text{Gas}}^2} + \frac{\alpha(1-\alpha)p_{\text{Fl}}}{p}}$$

$$a_m \leq a_{\text{Dampf}} \leq a_{\text{H}_2\text{O}}$$

5.2.2 Außenströmung



Widerstand F_W aus

- Reibungswiderstand
- Formwiderstand

Auftrieb F_A durch

- Anstellung
- Wölbung

**dimensionsloser
Widerstandsbeiwert**

**dimensionsloser
Auftriebsbeiwert**

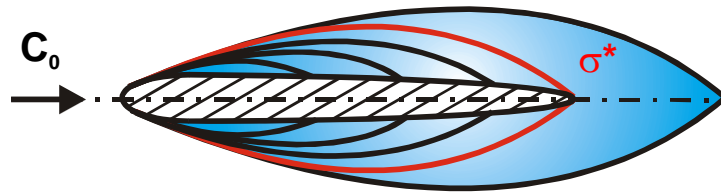
$$c_W = \frac{F_W}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2 \cdot A}$$

$$c_A = \frac{F_A}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2 \cdot A}$$

f(Geometrie,
Anstellwinkel α ,
Reynoldszahl,
Rauigkeit k/L ,
Turbulenzgrad,
Fortschrittsgrad der Kavitation σ)

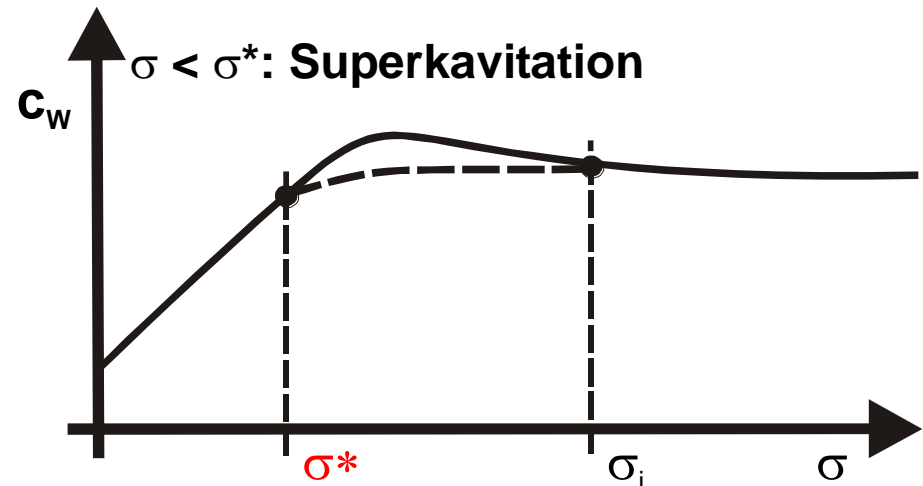
Symmetrische Körper ohne Anstellung

a.) schlanke Körper ($B \ll L$)



Erklärung der Widerstandsänderung

- Keine Wandschubspannung infolge der Dampfschicht.
- Umschlag von laminarer zur turbulenter Grenzschicht verlagert:
 - höhere Reibungsverluste (c_w vergrößert)
 - Verhinderung der Ablösung (c_w verkleinert)



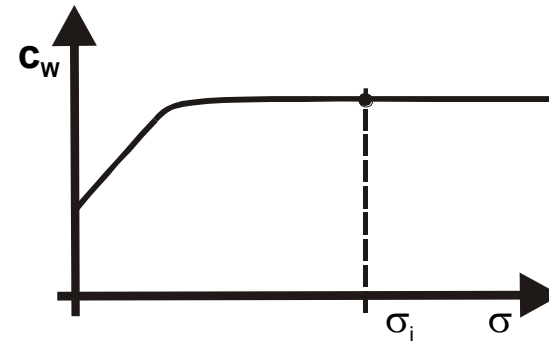
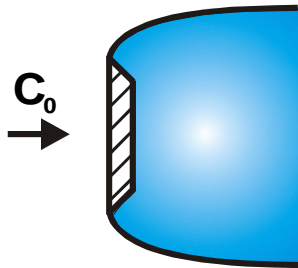
5.2.2 Außenströmung

(3/6)

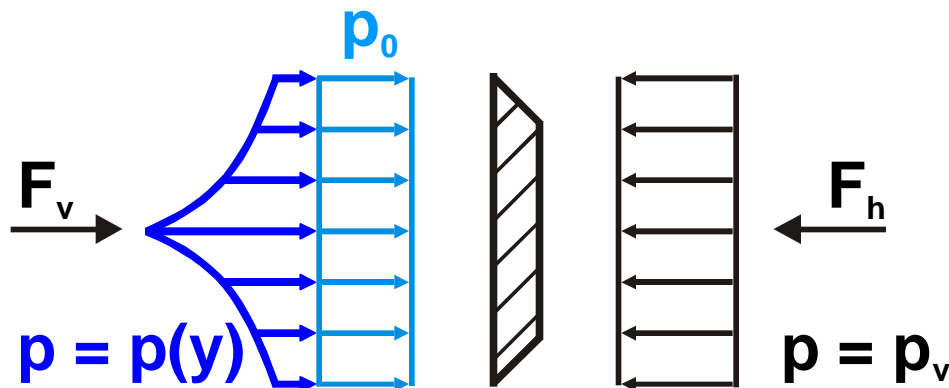


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

b.) stumpfe Körper ($L \ll B$)



Lineares c_w - σ -Gesetz bei Superkavitation



Änderung von σ durch p_0 ($F_r \sim p_0$)

$$p(y) + \frac{\rho}{2} c^2(y) = p_0 + \frac{\rho}{2} c_0^2$$

$$F_v = \int p(y) dA = \left[p_0 + \frac{\rho}{2} c_0^2 (1-k) \right] A$$

$$F_h = p_v \cdot A \quad \text{Formkonstante}$$

$$\Rightarrow \frac{F_v - F_h}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2 \cdot A} = \frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho}{2} \cdot c_0^2} + 1 - k$$

$$c_w = \sigma + 1 - k$$

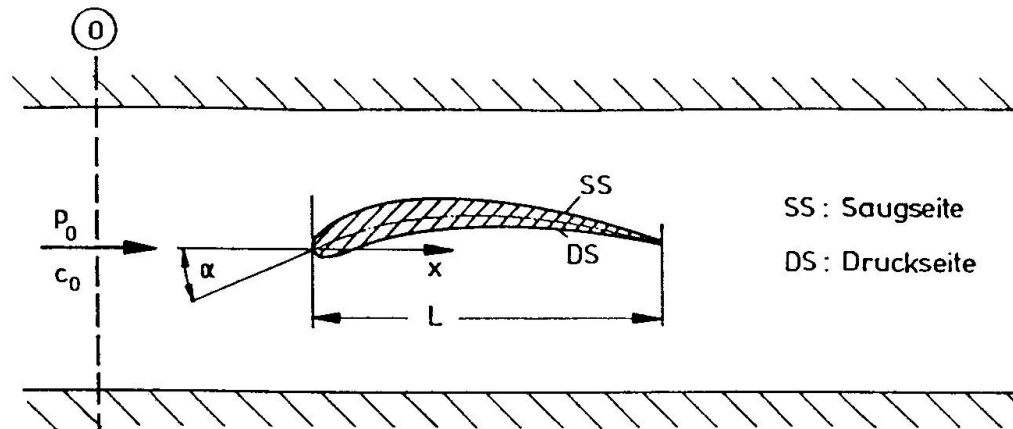
5.2.2 Außenströmung

(4/6)

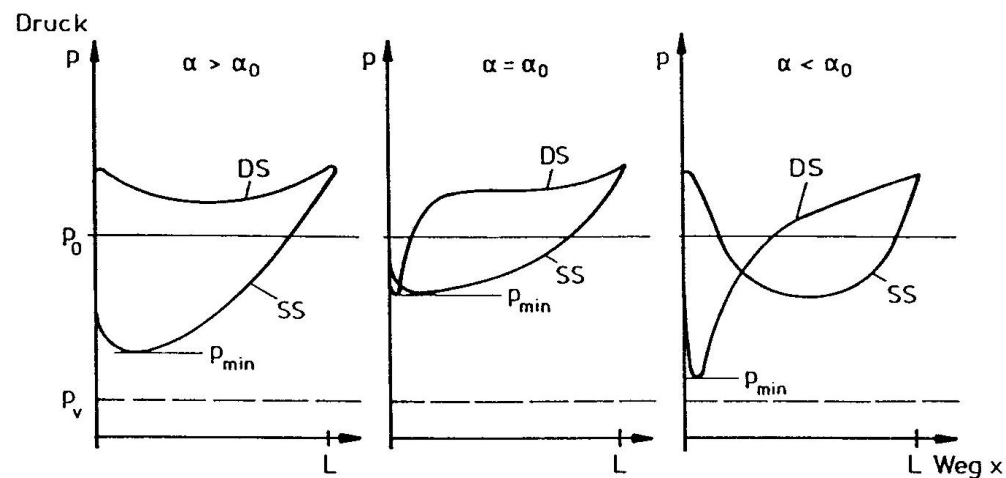


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

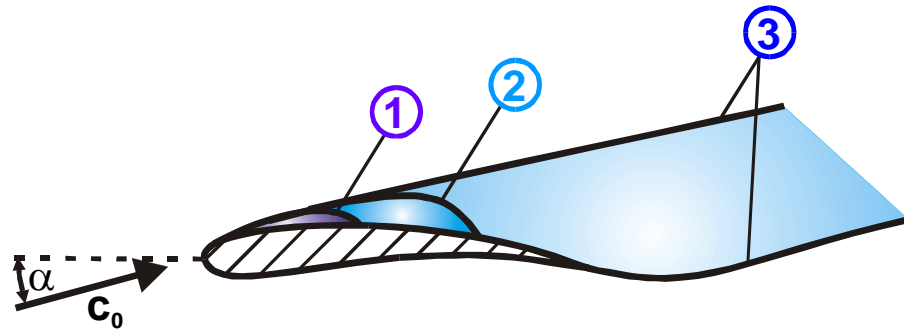
Gewölbte schlanke Körper



SS : Saugseite
DS : Druckseite

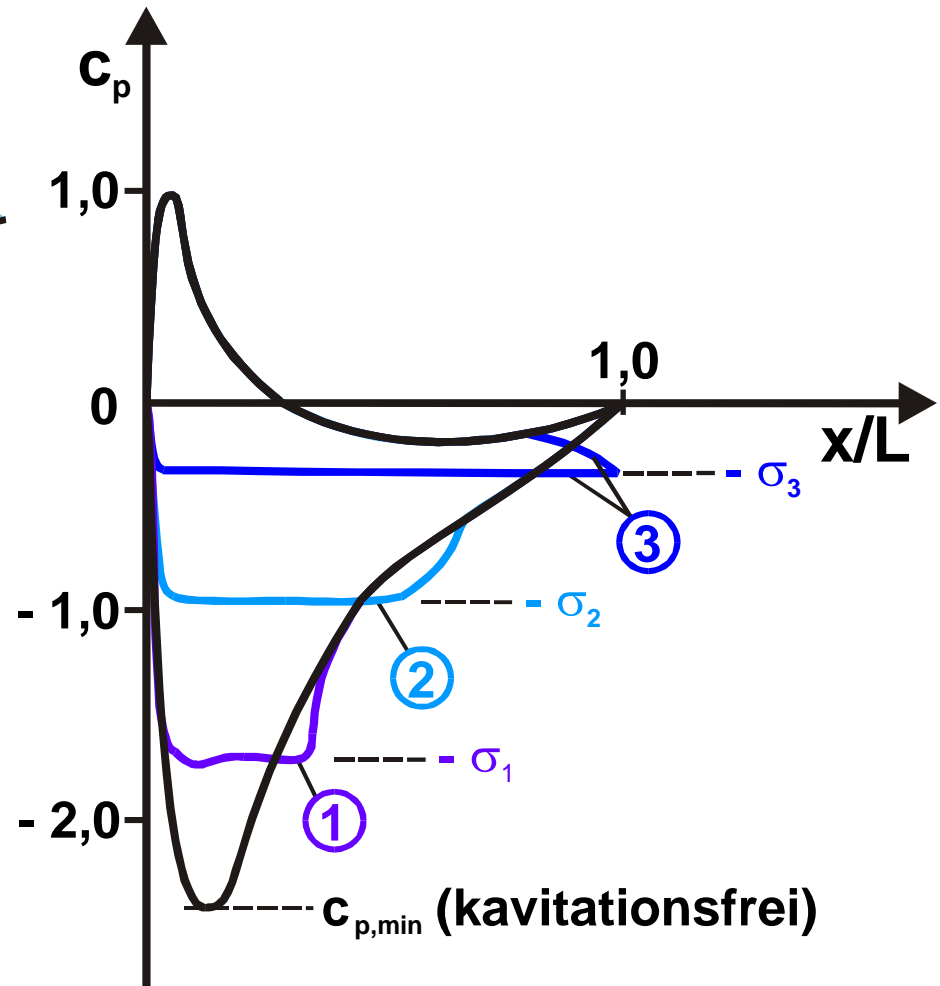


5.2.2 Außenströmung



Mit steigendem Fortschrittsgrad der Kavitation Abnahme des Auftriebs (entspricht der eingeschlossenen Fläche beim c_p -Verlauf), da auf SS Dampfdruck nicht unterschritten werden kann.

Bei Superkavitation treffen sich c_{pSS} und c_{pDS} nicht bei Null, sondern bei $c_p(p_v)$



5.2.2 Außenströmung

(6/6)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

