

2.2.6 Blasen-Implosion (1)

Erste Theorie von Lord RAYLEIGH (1917)

- Annahmen:
- $p_G = 0$
 - $\tau = 0$
 - $\mu_{Fl} = 0$
 - $\rho_{Fl} = \text{const}$
 - $\vartheta = \text{const}$
 - $p_\infty = \text{const} > p_v$

$$t = 0: R = R_{\max}, \quad \dot{R} = \ddot{R} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{R} = -\sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_\infty - p_v}{\rho_{Fl}} \cdot \left[\left(\frac{R_{\max}}{R} \right)^3 - 1 \right]}$$

$$R_{\min} = 0$$

$$t_{\text{Impl}} = 0,915 \cdot R_{\max} \sqrt{\frac{\rho_{FL}}{p_\infty - p_v}}$$

Beispiel

$$p_\infty = 1 \text{ bar}, \quad \vartheta = 20 \text{ °C}$$

$$\rho_{Fl} = 10^3 \text{ kg/m}^3, \quad R_{\max} = 1 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow t_{\text{Impl}} = 9,3 \cdot 10^{-5} \text{ s} = 93 \text{ } \mu\text{s}$$

2.2.6 Blasen-Implosion (2)

Verbesserte Beschreibung mit: • $\mu_{Fl} = 0$

• $\rho_{Fl} = \text{const}$

• $\Delta p_v = 0$

jedoch:

• $p_G \neq 0$, $p_G = p_{G,A}$ bei $R = R_{\max}$

• $\tau \neq 0$

ergibt **ungedämpfte, nicht-lineare Blasenschwingung** mit

- $R_{\min} > 0$

- R_m aus
$$p_\infty - p_v = p_{G,A} \left(\frac{R_{\max}}{R_m} \right)^{3n} - \frac{2 \cdot \tau}{R_m}$$

$n = 1$: isotherm

$n = \kappa$: adiabat

- Eigenfrequenz

$$\omega_e = \frac{1}{R_m} \sqrt{\frac{3n \cdot (p_\infty - p_v) + (3n - 1) \cdot \frac{2 \cdot \tau}{R_m}}{\rho_{FL}}}$$

2.2.6 Blasen-Implosion (3)

Beispiel:

$$p_{\infty} = 1 \text{ bar}$$

$$\vartheta = 20 \text{ °C}$$

$$R_{\max} = 1 \text{ mm}$$

$$p_{G,A} = 0,01 \text{ bar}$$

a.) isotherm:

$$R_m = 0,215 R_{\max}$$

$$\omega_e = 79,8 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$f_e = 12,7 \text{ kHz}$$

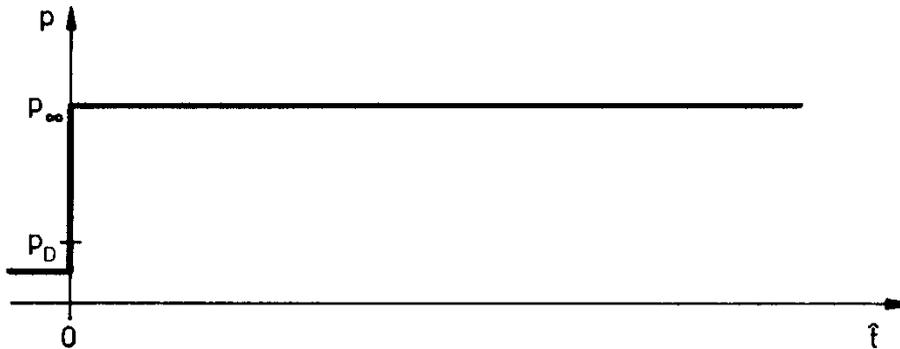
b.) adiabat ($\kappa = 1,4$):

$$R_m = 0,335 R_{\max}$$

$$\omega_e = 60,6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$f_e = 9,6 \text{ kHz}$$

2.2.6 Blasen-Implosion (4)

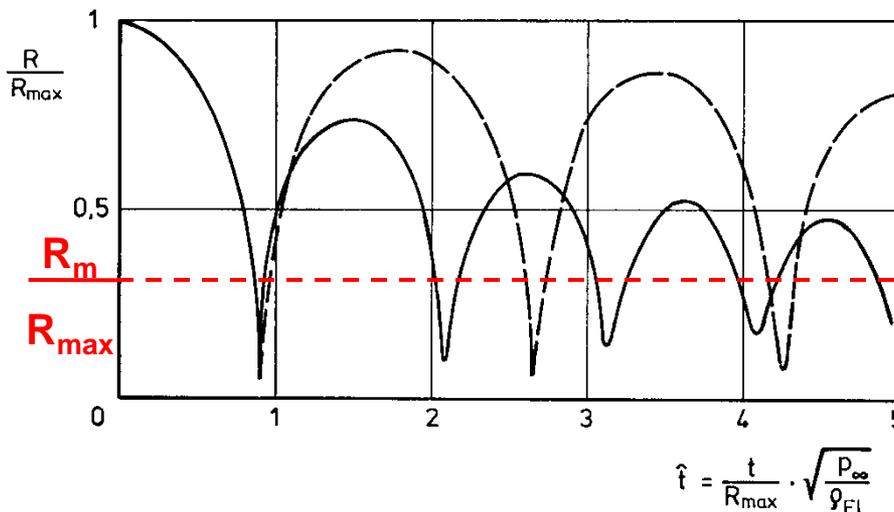


Zeitlicher Druckverlauf

$p_\infty = 1 \text{ bar}$; $p_v = 0,0234 \text{ bar}$

$p_{G,A} = 0,01 \text{ bar}$; $R_0 = 10^{-2} \text{ mm}$

adiabat $\kappa = 1,4$; $R_m/R_{\max} = 0,3$

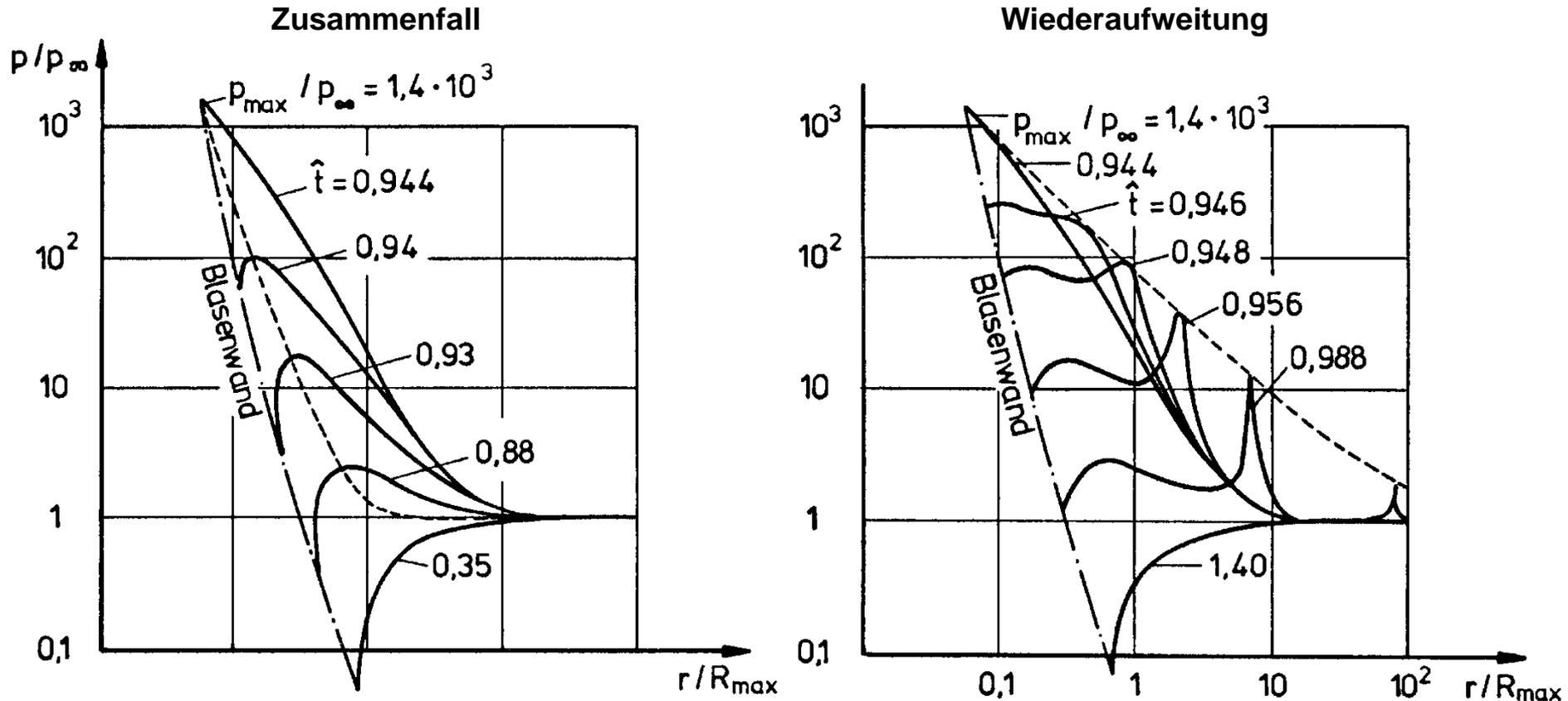


Zeitlicher Blasengrößenverlauf

----- Flüssigkeit inkompressibel

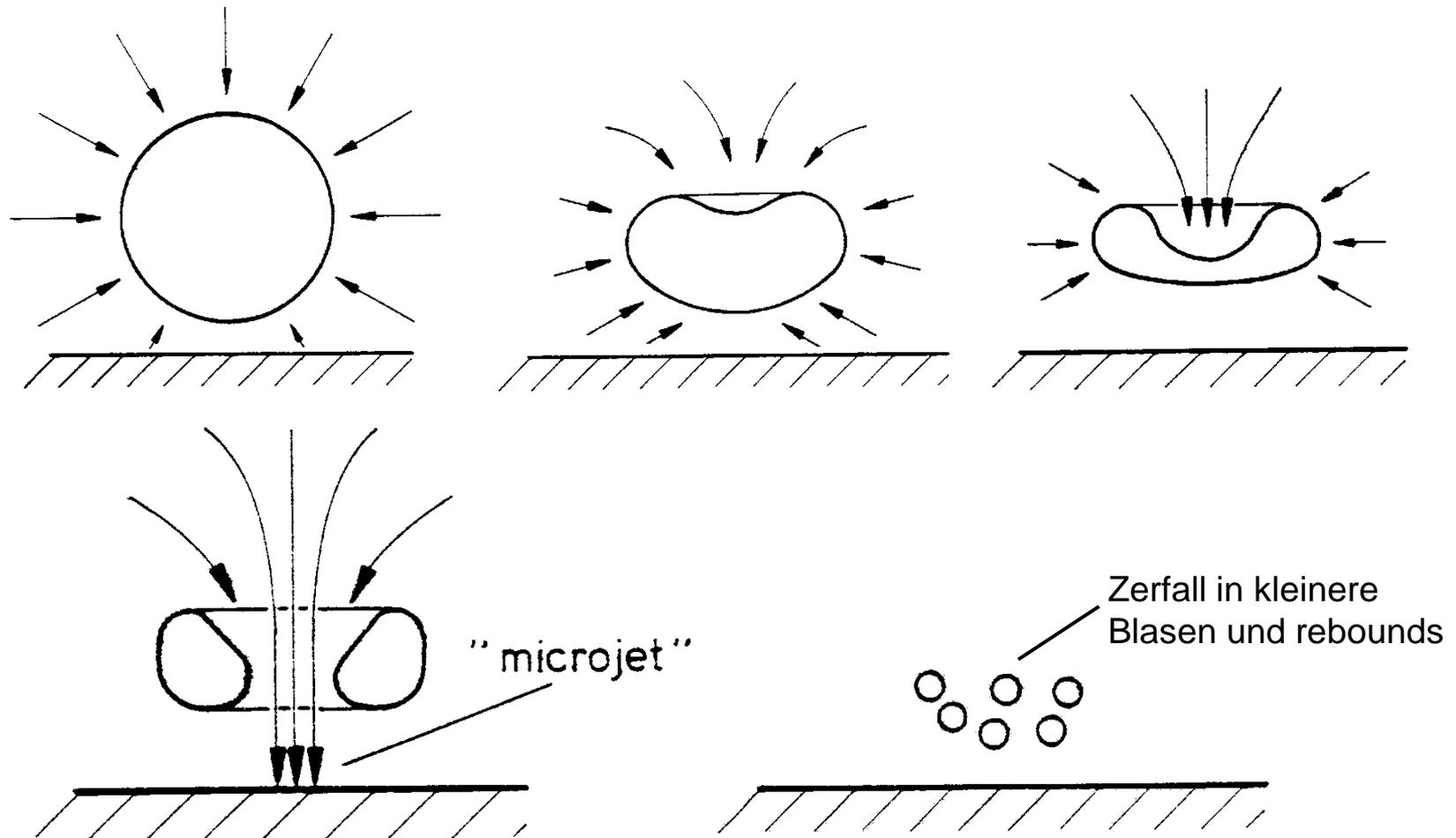
———— Flüssigkeit kompressibel

2.2.6 Blasen-Implosion (5)

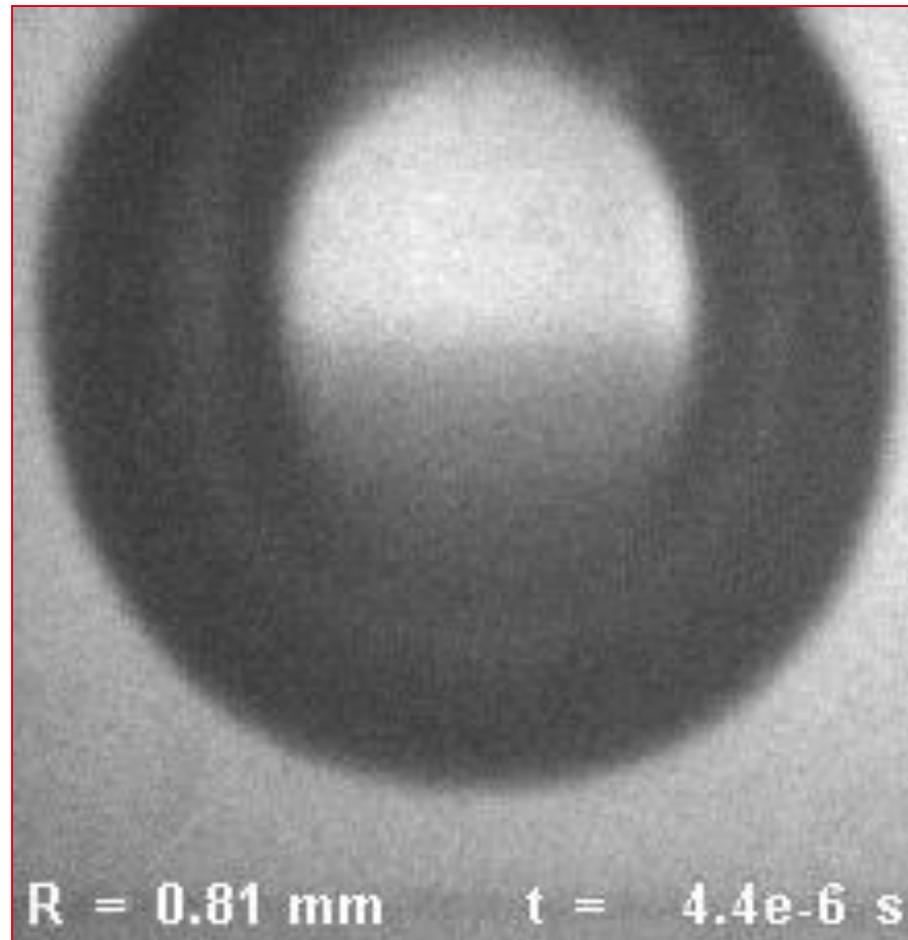


$p_{\infty} = 0,703 \text{ bar}, \quad \vartheta_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad p_{G,A} = 0,007 \text{ bar}, \quad R_{\max} = 1 \text{ mm}$

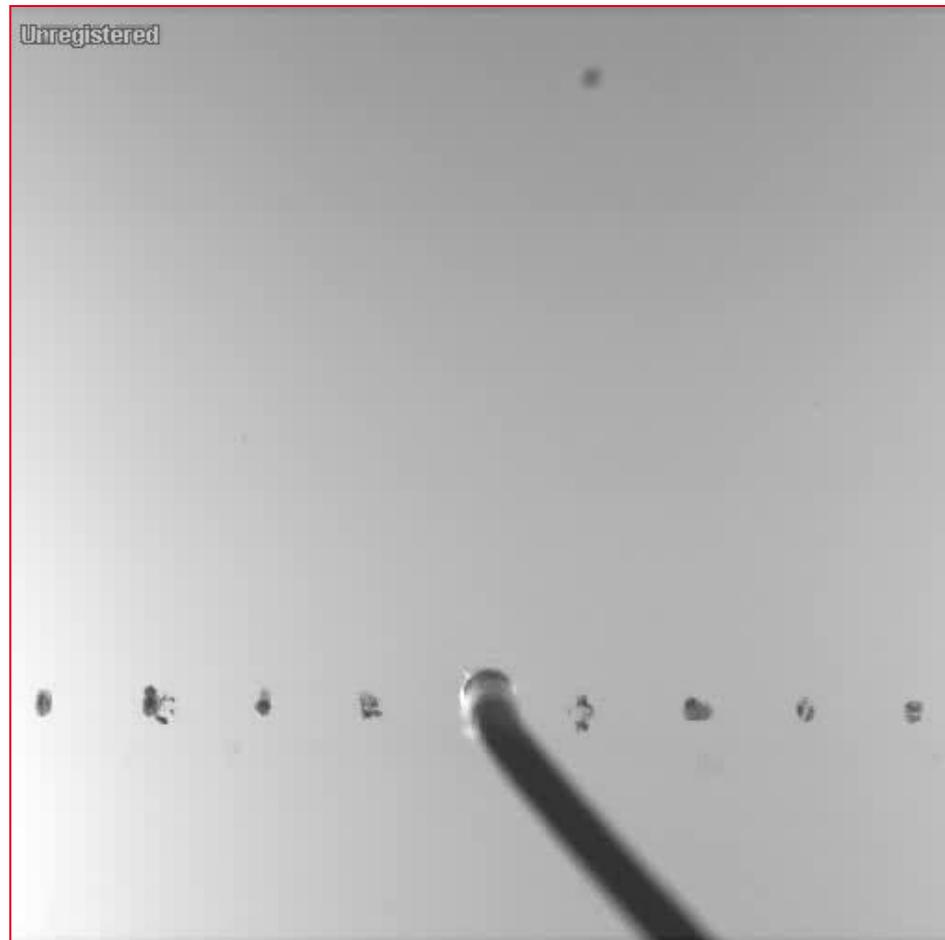
2.2.6 Blasen-Implosion (6)



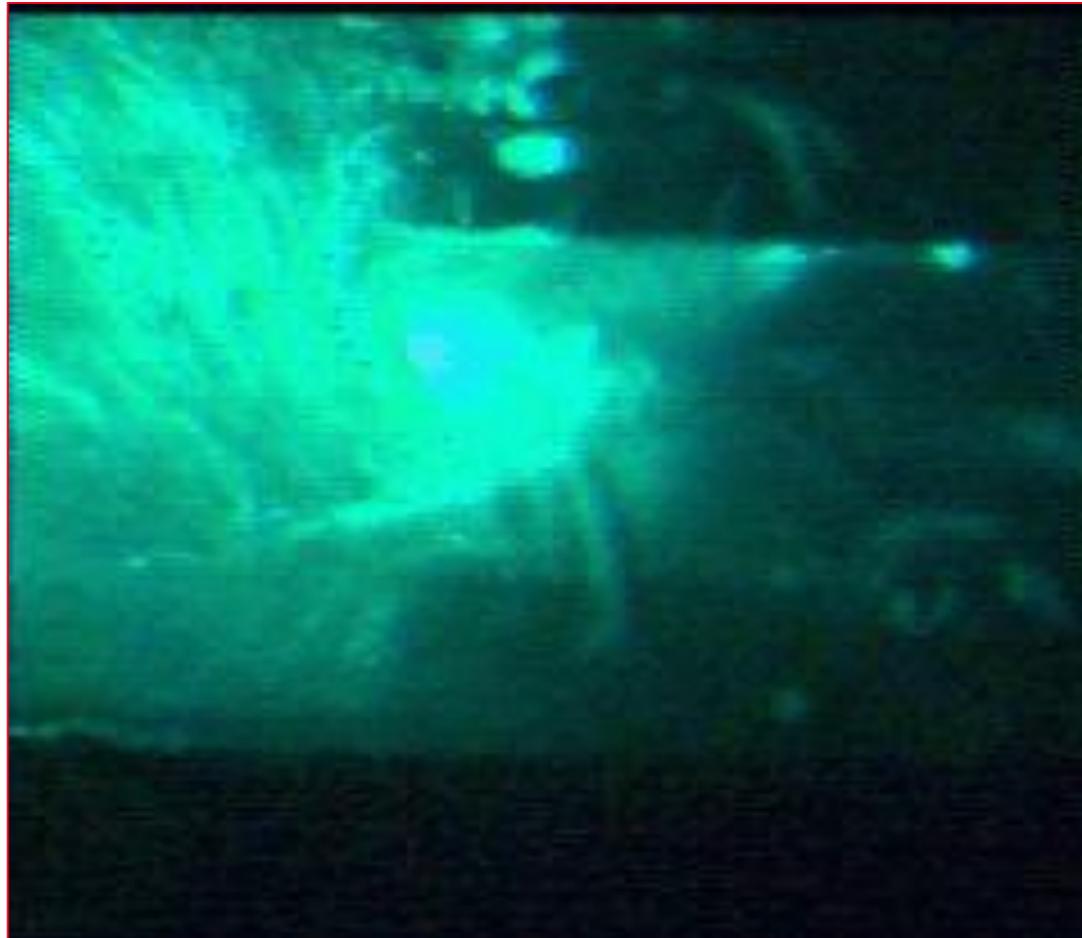
2.2.6 Einzelblasenkollaps (1)



2.2.6 Einzelblasenkollaps (2)



2.2.6 Kavitation an einem „ratternden“ Druckbegrenzungsventil



Inhaltsübersicht zum Kapitel 3 „Untersuchungen zum Kavitationsbeginn“



3.1 Einleitung

3.2 Physikalische Einflussgrößen auf den Kavitationsbeginn

3.2.1 Flüssigkeitseigenschaften

3.2.1.1 Keimgehalt

3.2.1.2 Zugfestigkeit

3.2.2 Art der Feststellung

3.2.3 „Wirkdauer“ Δt von p_i

3.2.4 Hydrodynamische Einflüsse

3.2.4.1 Potentialtheoretische Druckverteilung

3.2.4.2 Reibungseffekte

3.3 Empirische Ansätze von Keller für die hydrodynamische Maßstabeffekte

3.3.1 Geschwindigkeitseinfluss

3.3.2 Größeneinfluss

3.3.3 Einfluss der Turbulenz

3.1 *Einleitung (1)*

Art und Zweck

- A** Nachweisversuche → Nachweis
- B** Entwicklungsversuche → Verbesserung
(d.h. Optimierung zu kleineren σ -Zahlen)
Erprobung
- C** Grundlagenversuche → Allgemeine Einflüsse und Gesetzmäßigkeiten

Versuchsdurchführung und -auswertung

- Geometrie, Strömung konstant
- Variation von p
- Feststellung des Kavitationsbeginns
- Messung des zugehörigen Zustandes

Bei **A**, **B** (**Modell**versuche):

- Übertragung der Ergebnisse auf Originalbedingungen

3.1 Einleitung (2)

Ähnlichkeitskennzahl bei Kavitationsversuchen

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho}{2} c_0^2}$$

Für Kavitationsbeginn:

$$\sigma = \sigma_i$$

Bei **strenger** Ähnlichkeit:

$$(\sigma_i)_{\text{Original}} = (\sigma_i)_{\text{Modell}}$$

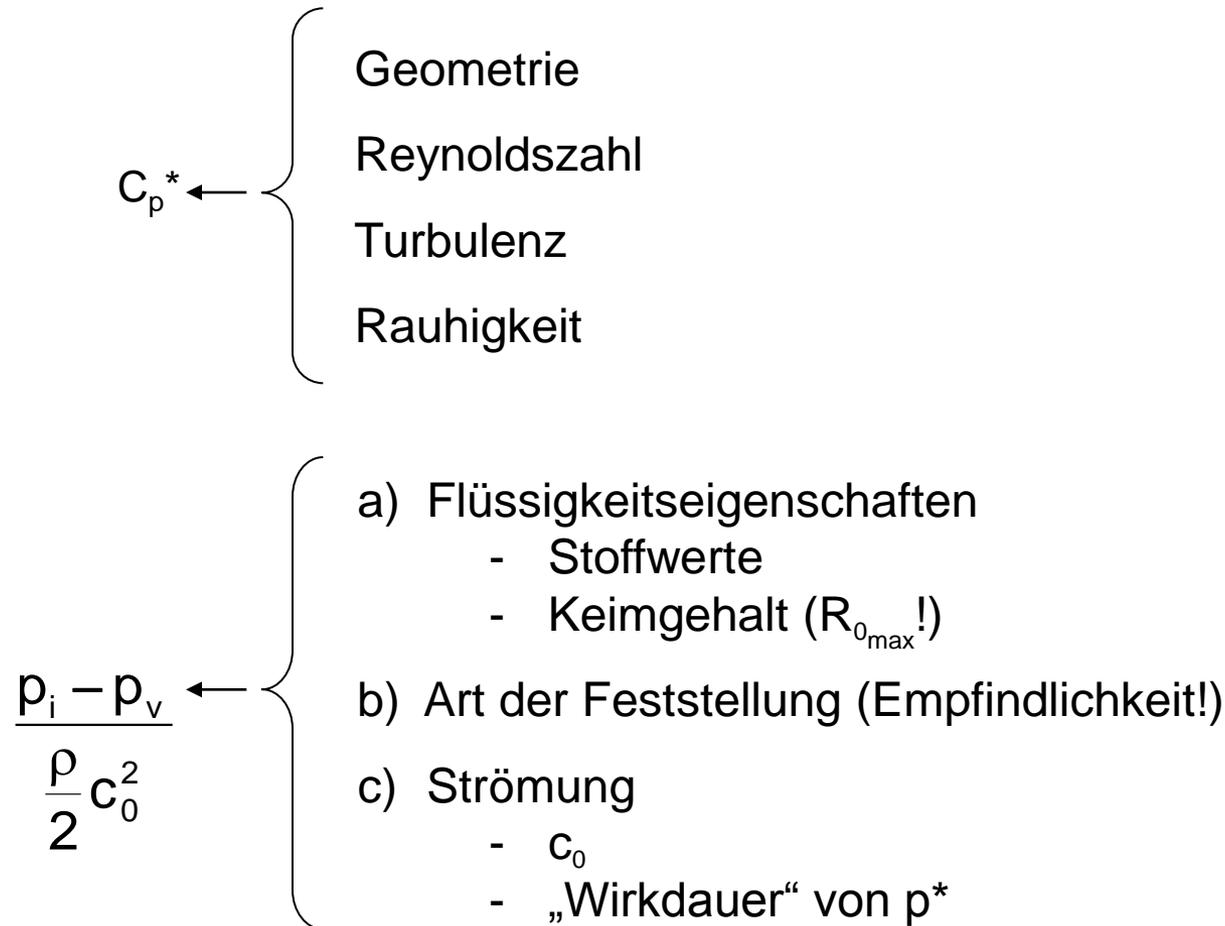
Wenn nur **geometrische** Ähnlichkeit: $(\sigma_i)_{\text{Original}} \neq (\sigma_i)_{\text{Modell}}$

Maßstabeffekte
(„scale effects“)

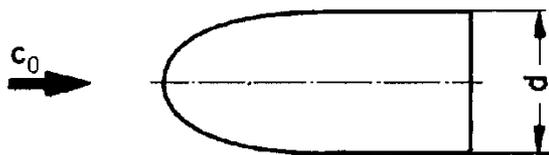
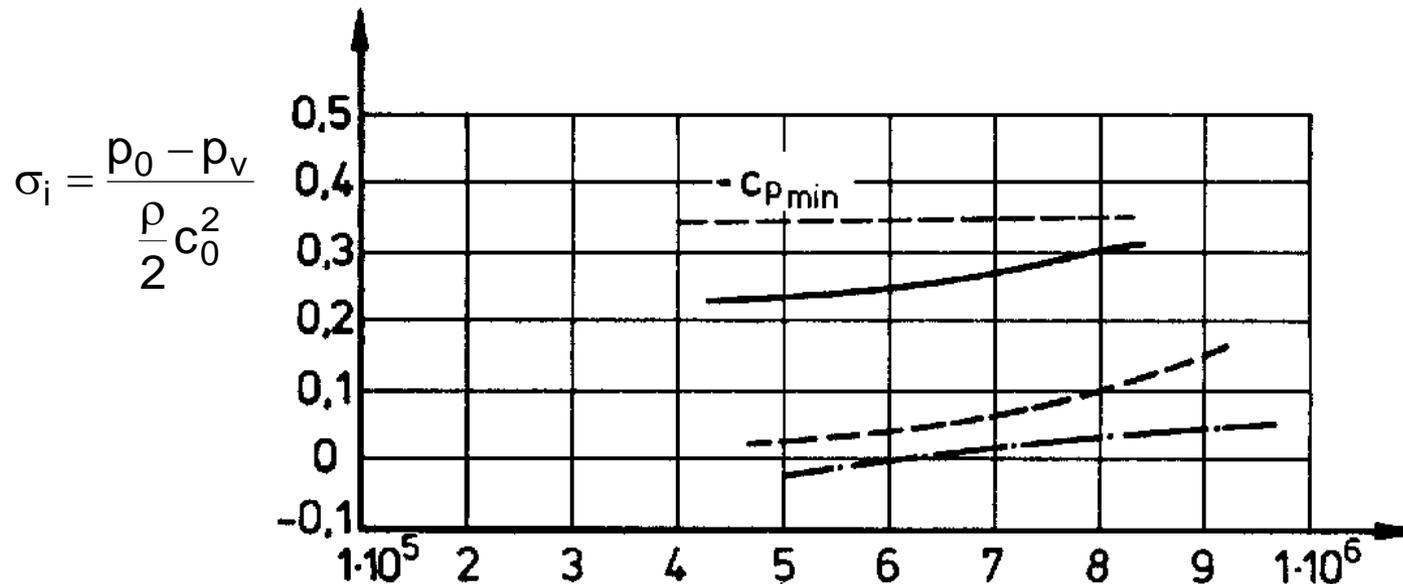
$$\sigma = \sigma_i, \text{ wenn } p^* = p(\vec{r}^*, t^*) = p_i \quad \Rightarrow \quad \sigma_i = \left(\frac{p_0 - p_v}{\frac{\rho}{2} c_0^2} \right)_i = \underbrace{\frac{p_0 - p^*}{\frac{\rho}{2} c_0^2}}_{-c_p^* > 0} + \underbrace{\frac{p_i - p_v}{\frac{\rho}{2} c_0^2}}_{\leq 0}$$

(für „echte“ Kavitation)

3.2 Physikalische Einflussgrößen auf den Kavitationsbeginn



3.2.1.1 Keimgehalt (1)



rot. symm. Halbkörper
(entstanden aus Punktquelle)

$$Re = \frac{c_0 \cdot d}{\nu}$$

- Frisches Leitungswasser
- - - - Wasser entgast
- · - · - Wasser entgast und gefiltert

3.2.1.1 Keimgehalt (2)



Keimgehalt abhängig von:

- Vorbehandlung des Fluids
(d.h. Beruhigen, Filtern, Aufheizen, Unterdruck)
- Konzentration der gelösten Gase
(→ Diffusionsvorgänge)
- Vorgeschichte
(d.h. Geschwindigkeits- und Druckänderungen
infolge der Anlagengestaltung)
- Referenzdruck p_0
(Keimgehalt ist abhängig vom Druckniveau)
- evtl. Keiminjektion