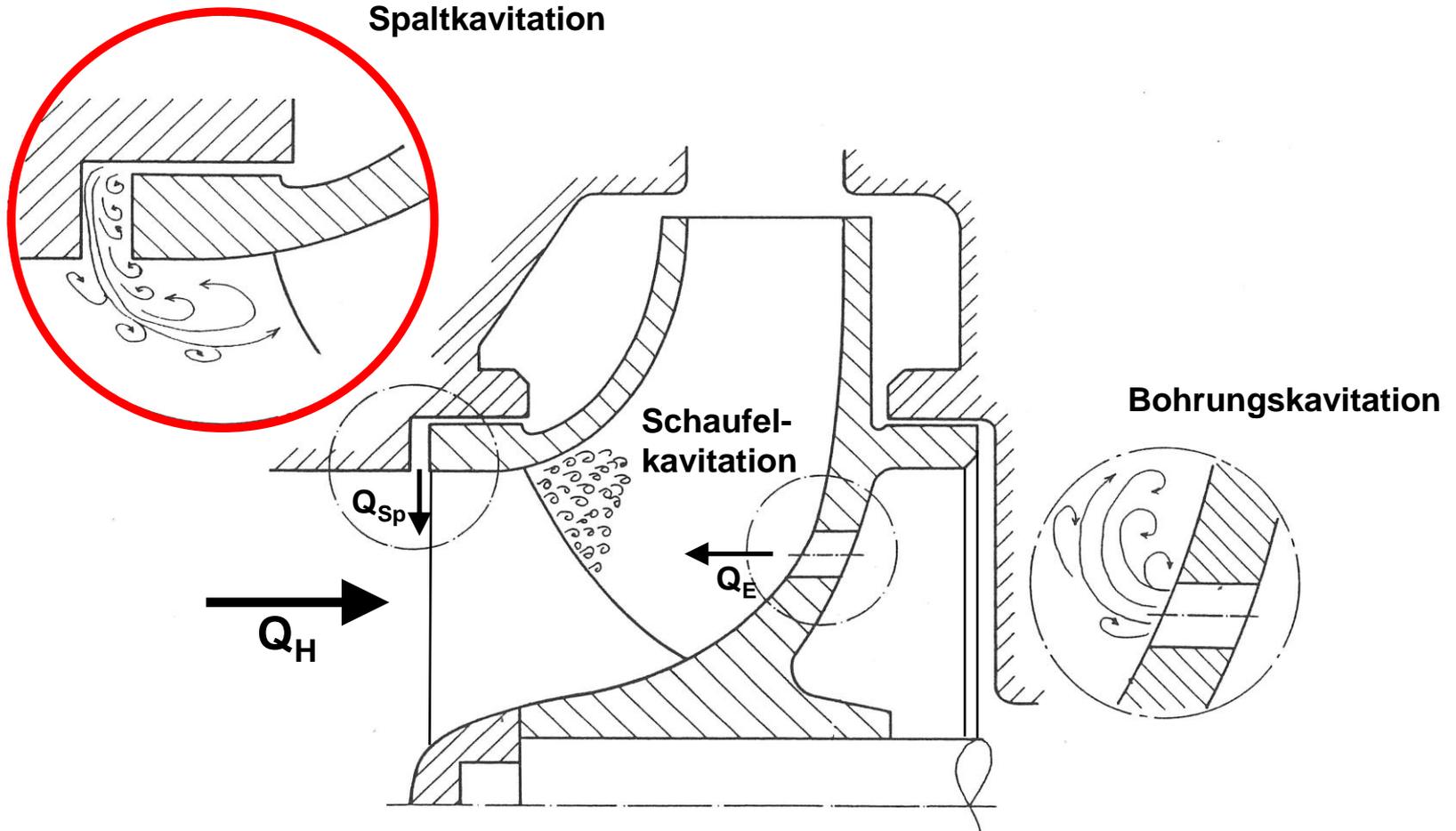
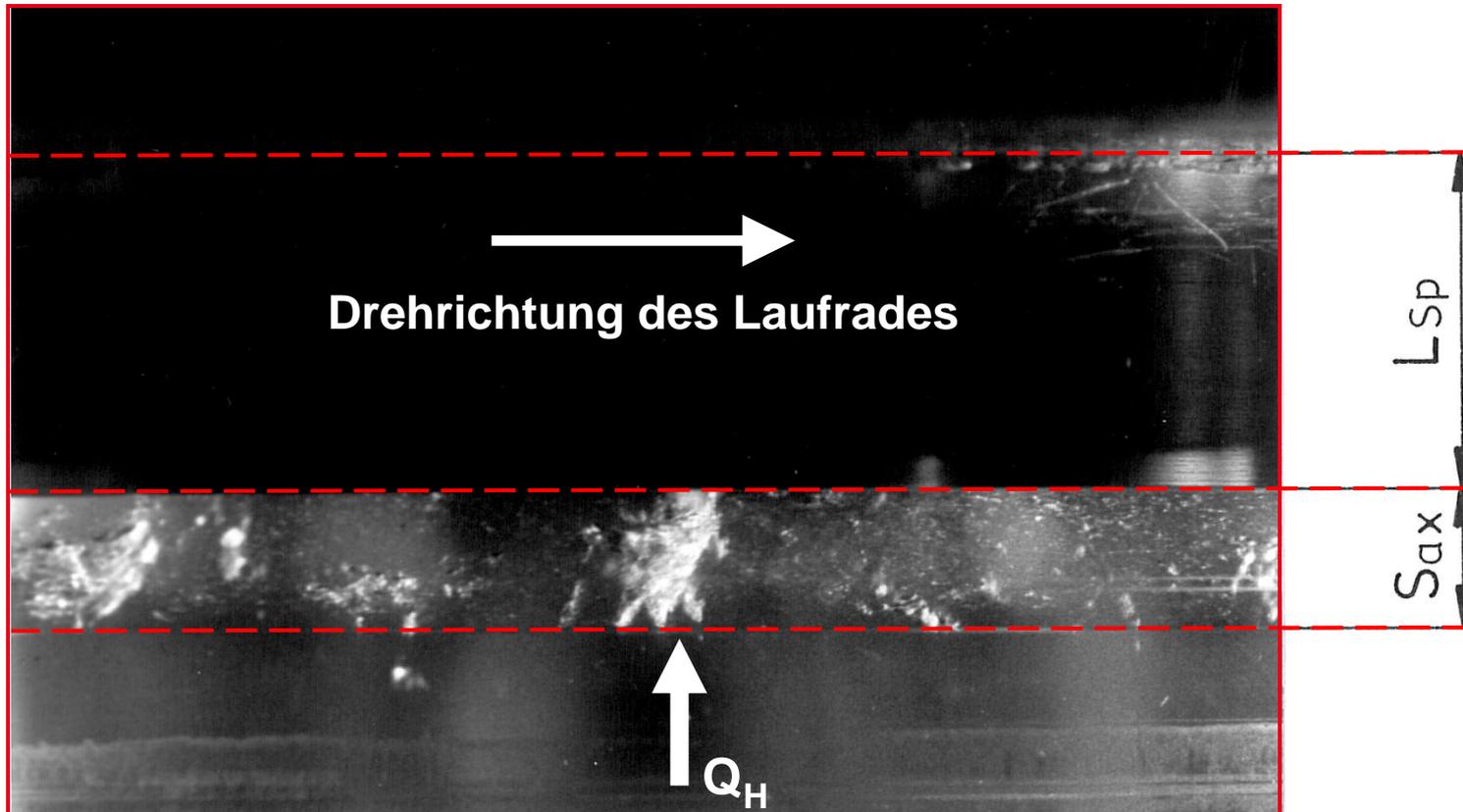


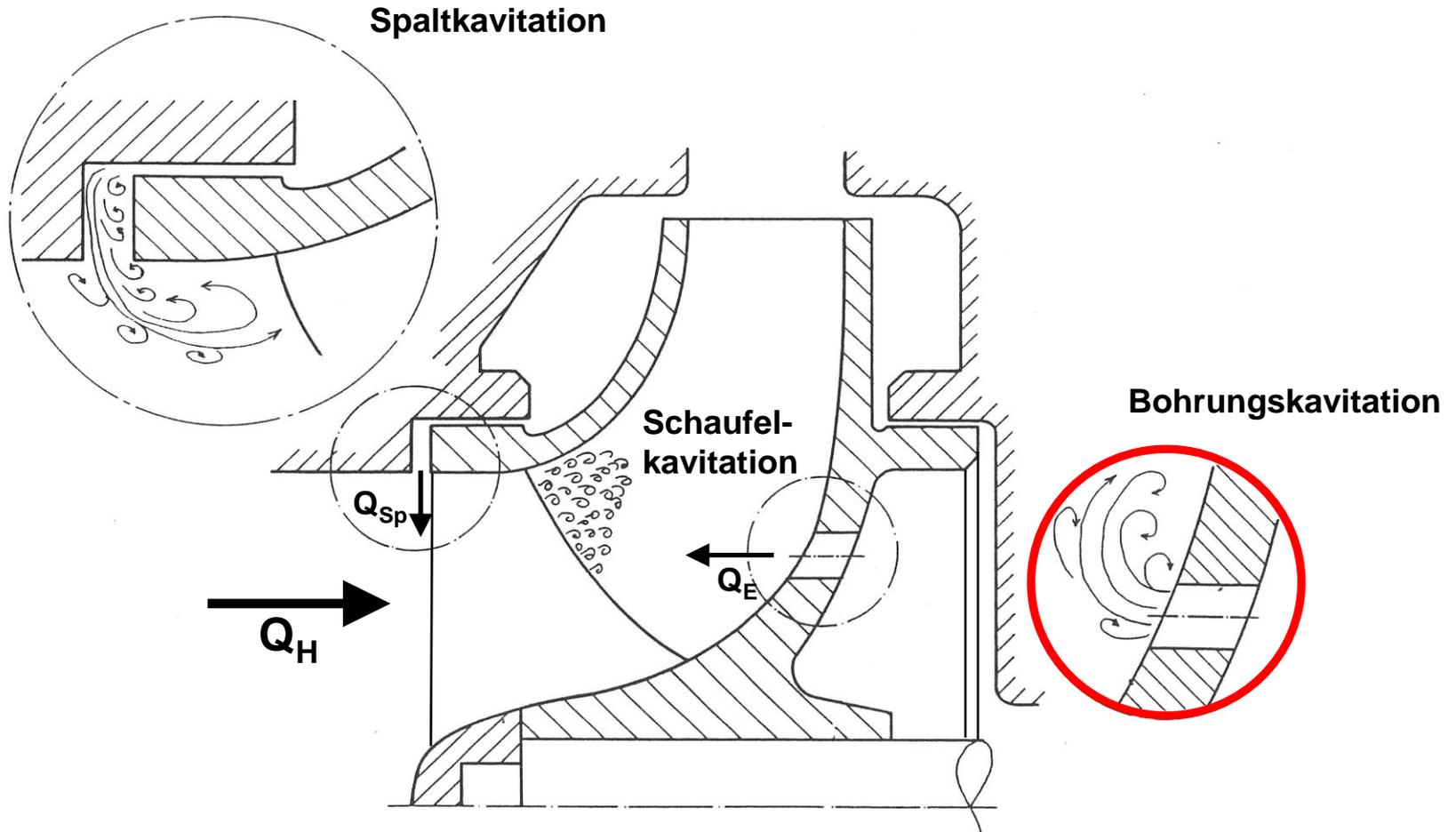
1.4.3 Typische Orte möglicher Kavitation in einer Kreiselpumpe - Spaltkavitation



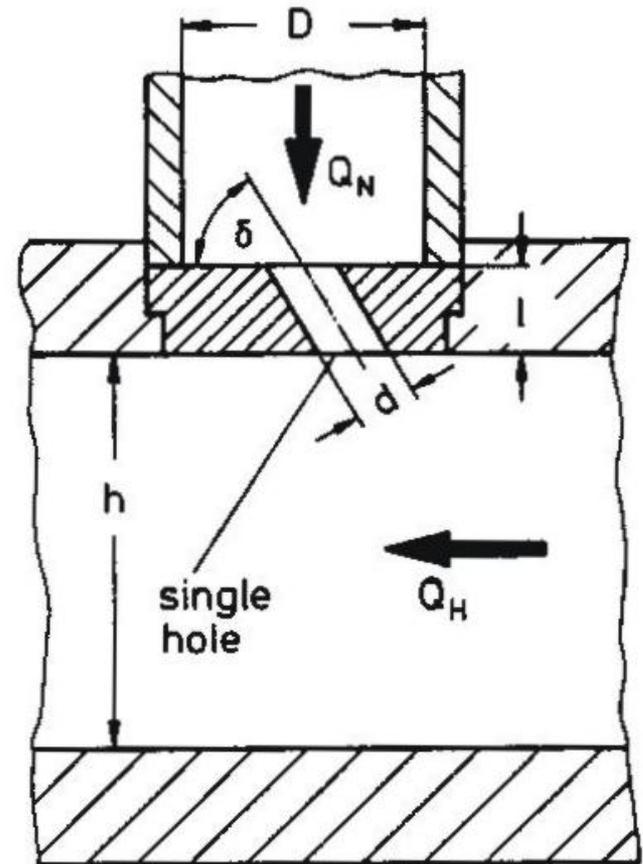
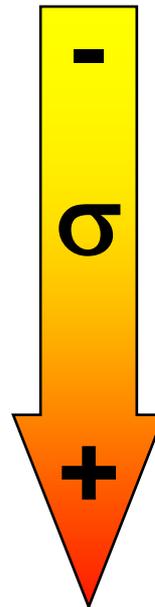
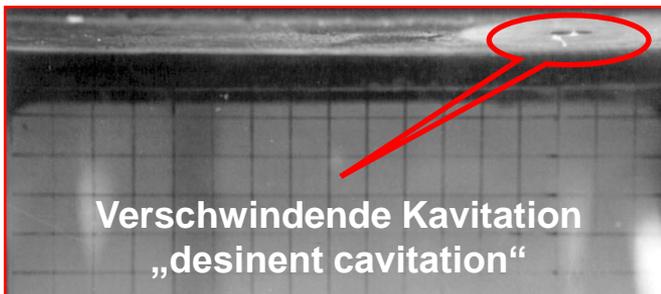
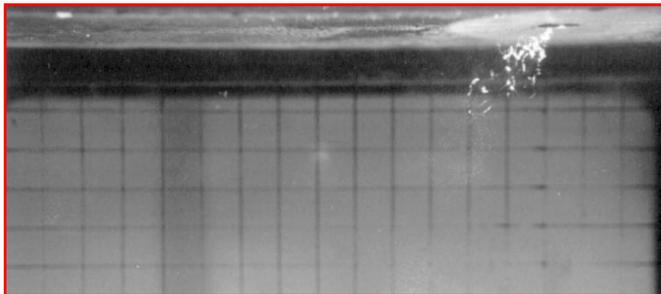
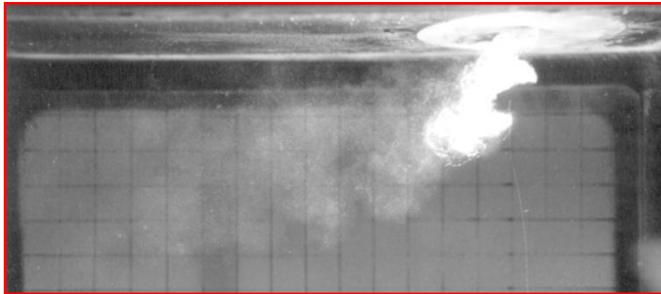
1.4.3 Kavitation am saugseitigen Drosselspalt einer radialen Kreiselpumpe



1.4.3 Typische Orte möglicher Kavitation in einer Kreiselpumpe - Bohrungskavitation



1.4.3 Bohrungskavitation beobachtet am Ersatzmodell einer Entlastungsbohrung



1.5 Einflussparameter auf den Kavitationsbeginn

$p_{x,\min}$ ist eine Funktion von:

- Reibungsverlusten
- Grenzschichten
- Strömungsablösung
- Turbulenzgrad
- Wandrauigkeit

1.5.1 Beispiel Zuspännungsfestigkeit (1)

Realität

- a) $p_{x,\min} = p_v$ „klassische“ Vorstellung
- b) $p_{x,\min} < p_v$ Zugspannungsfestigkeit der Flüssigkeit
- c) $p_{x,\min} > p_v$ “negative“ Zugspannungsfestigkeit (Pseudokavitation)

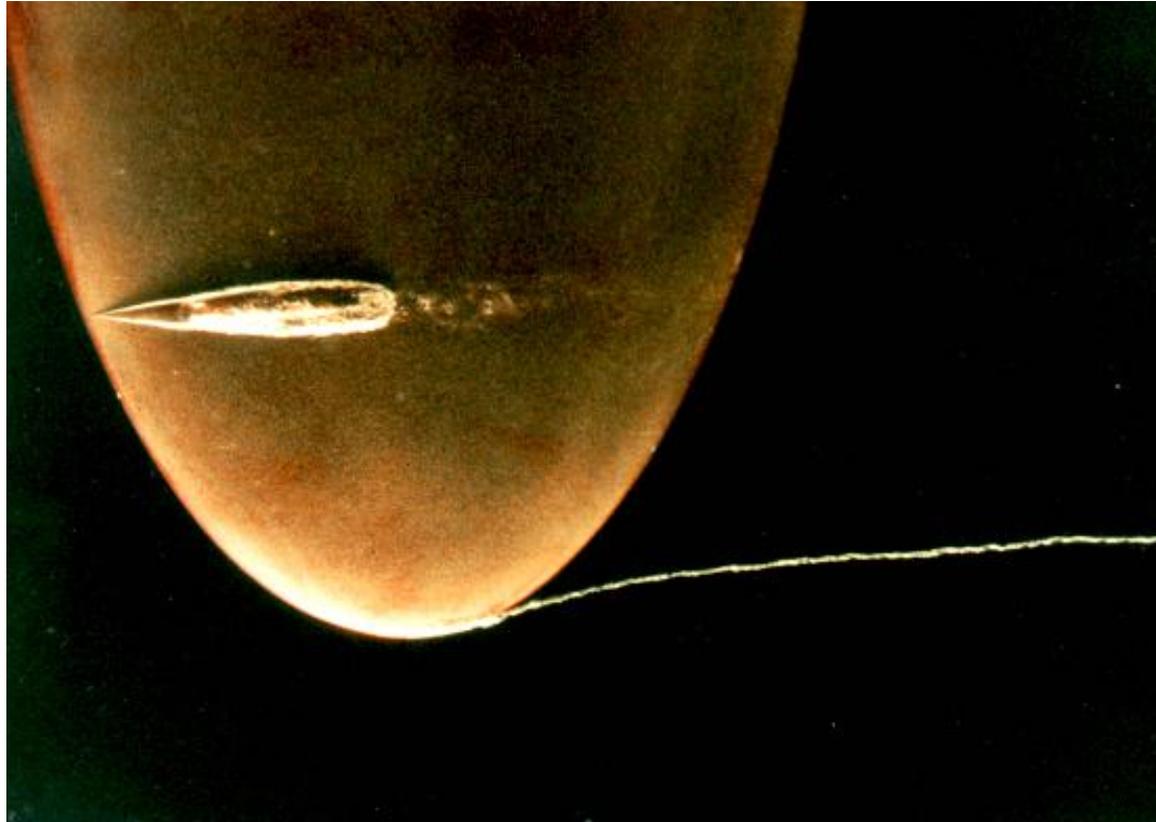
Grund

Abhängig von:

- Vorbehandlung
- Vorgeschichte
- Gehalt an gelöstem Gas
- Gehalt an sogenannten Kavitationskeimen

besitzt die Flüssigkeit eine gewisse Fähigkeit, Zugspannungen zu ertragen, bevor sie aufreißt. Sie verhält sich ähnlich, wie ein Stab unter Zugbelastung in der Werkstoffkunde.

1.5.1 Beispiel Zuspännungsfestigkeit (2)



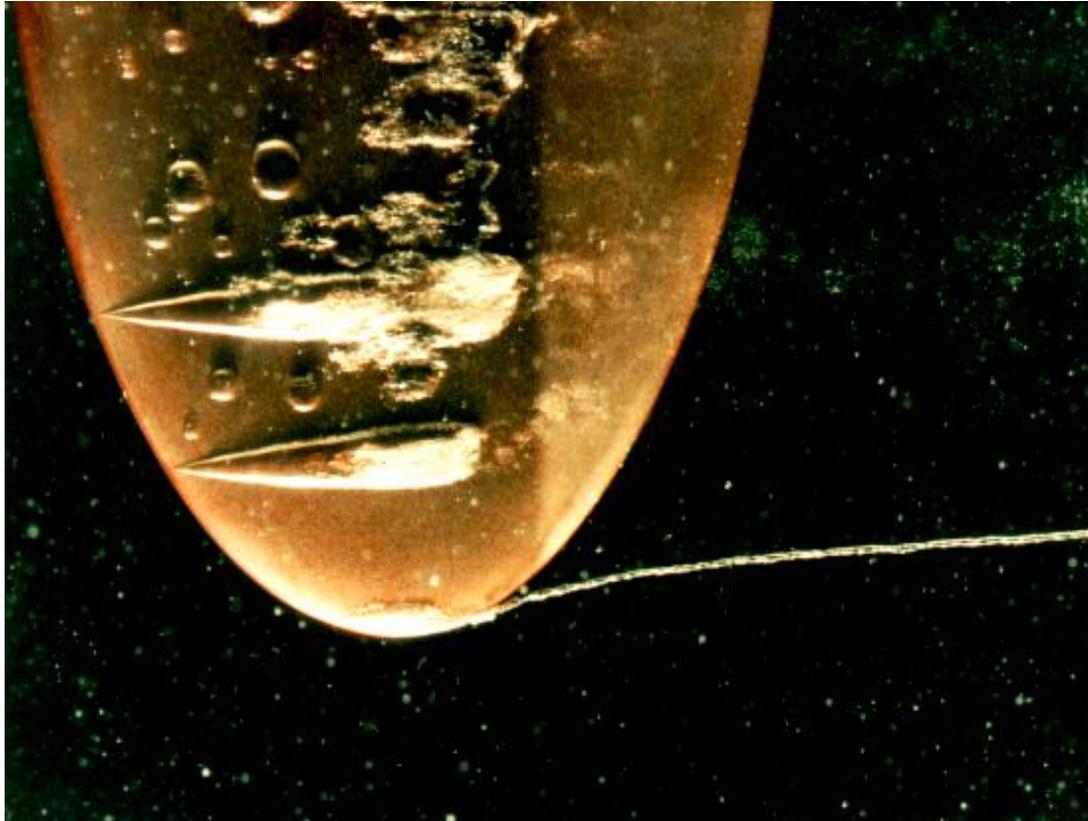
Verschwindende Zugspannungsfestigkeit
 $c_0 = 9,50 \text{ m/s}$; $\sigma = 0,69$

1.5.1 Beispiel Zugspannungsfestigkeit (3)



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

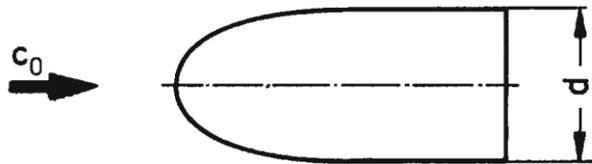
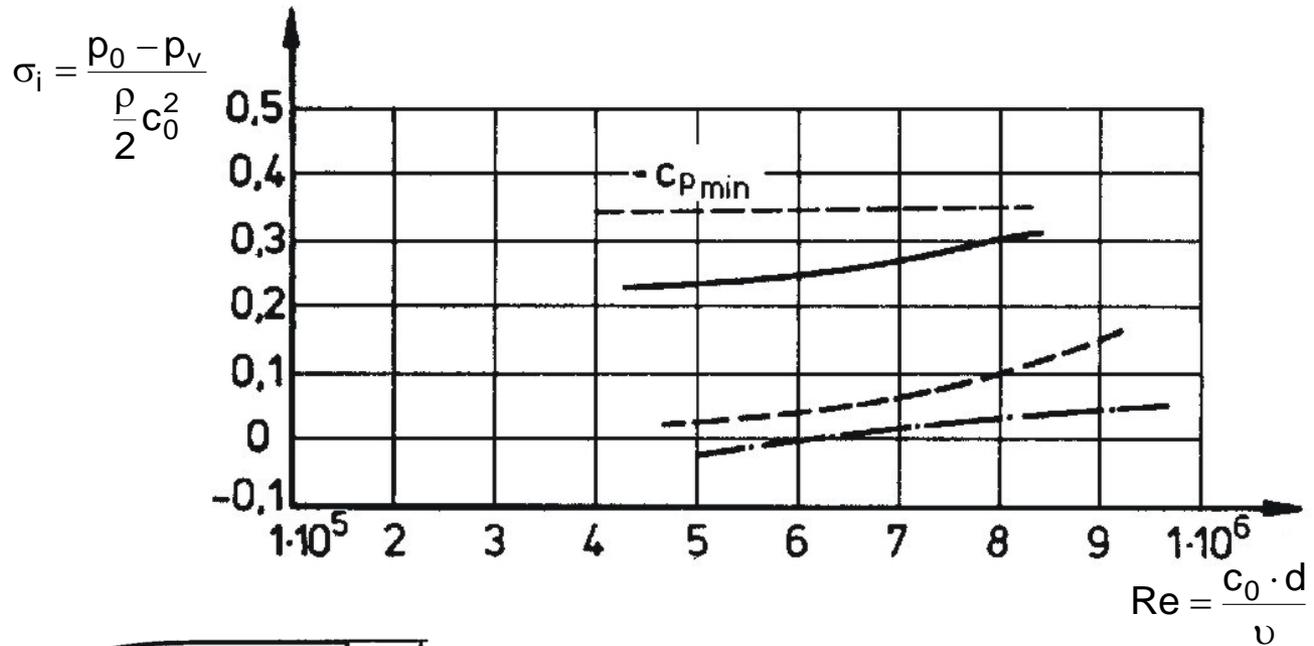
1.5.1 Beispiel Zuspännungsfestigkeit (4)



Negative Zugspannungsfestigkeit - Pseudokavitation

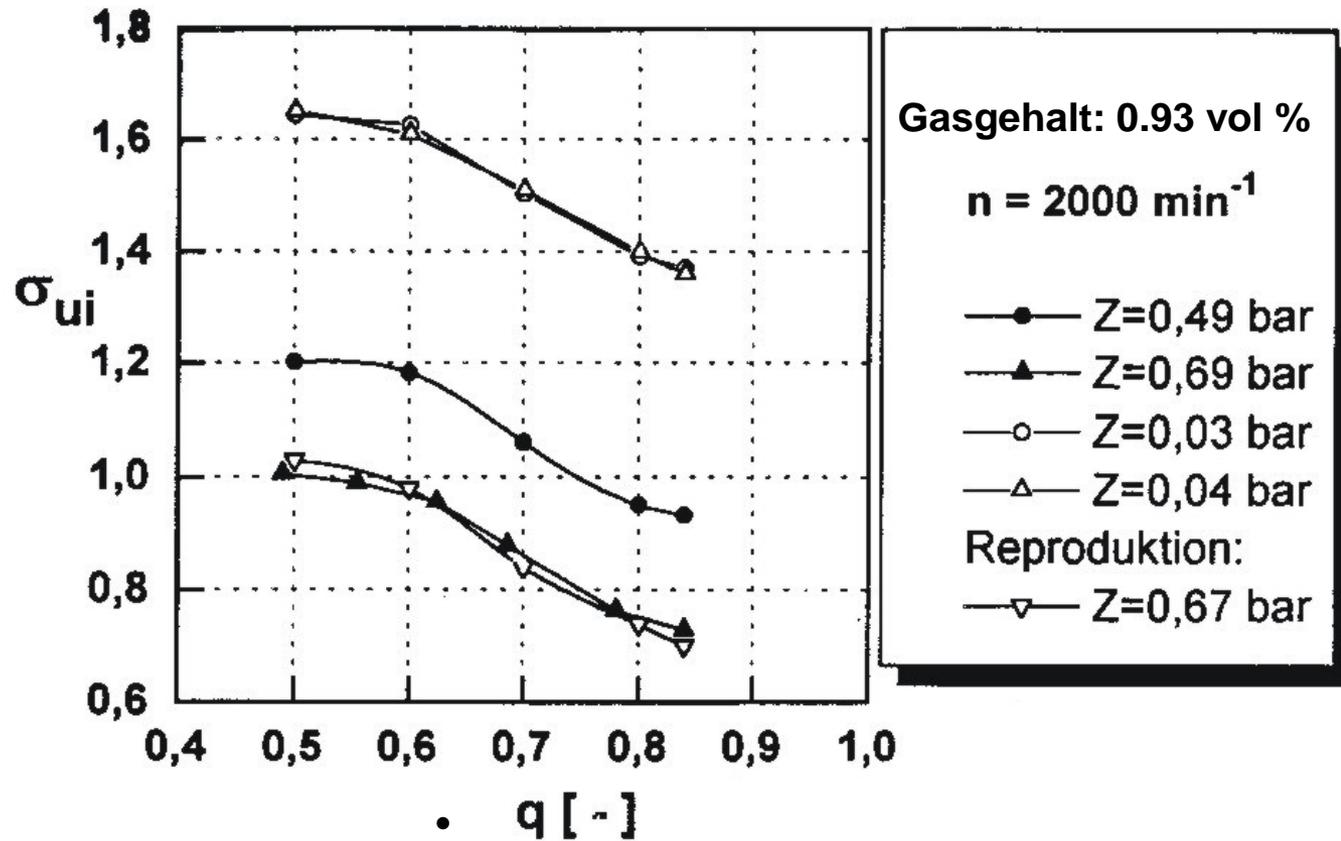
$$c_0 = 9,50 \text{ m/s}; \sigma = 0,69$$

1.5.1 Beispiel Zuspännungsfestigkeit (5)



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

1.5.1 Beispiel Zuspännungsfestigkeit (6)

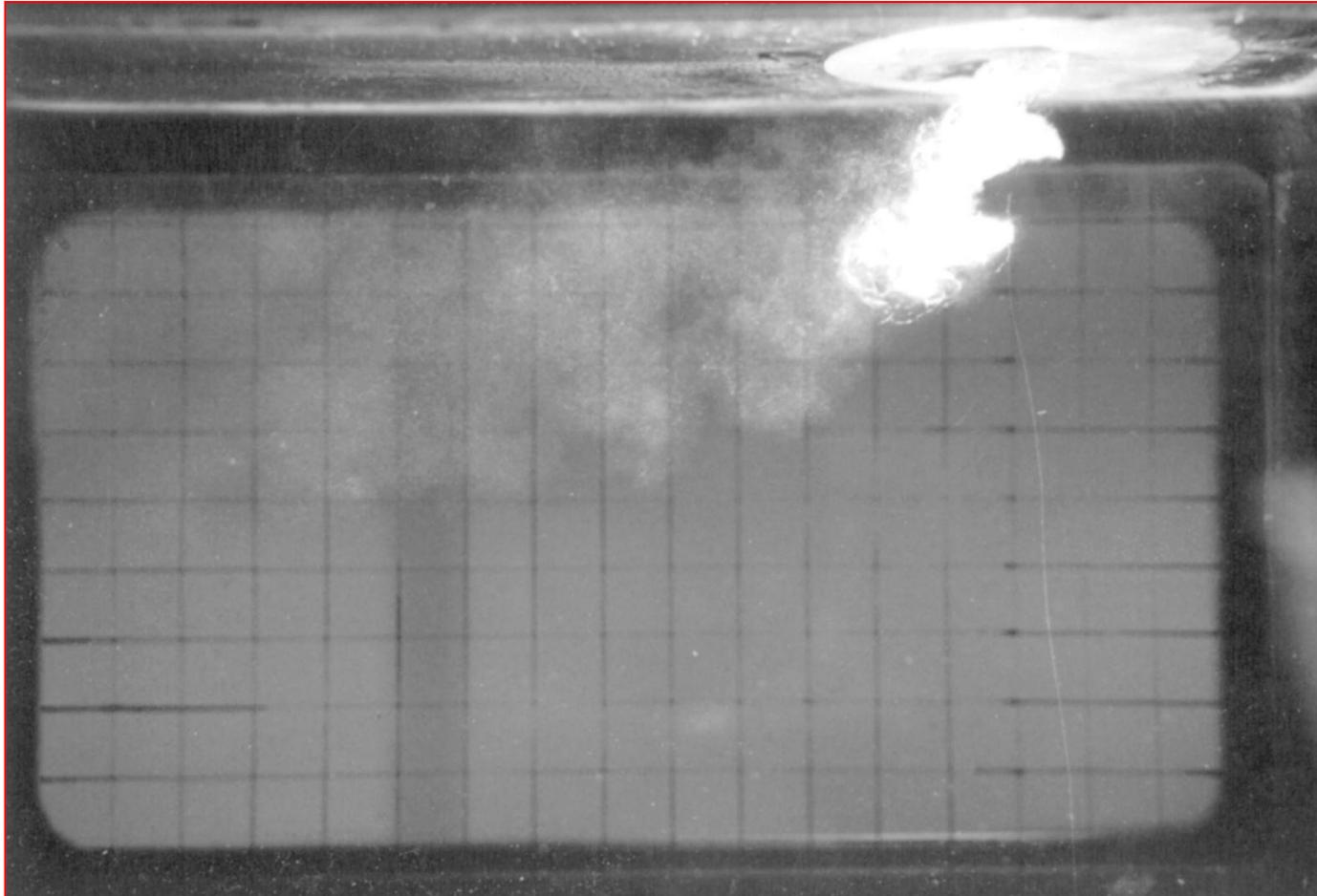


Fördergrad $q = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{opt}}$

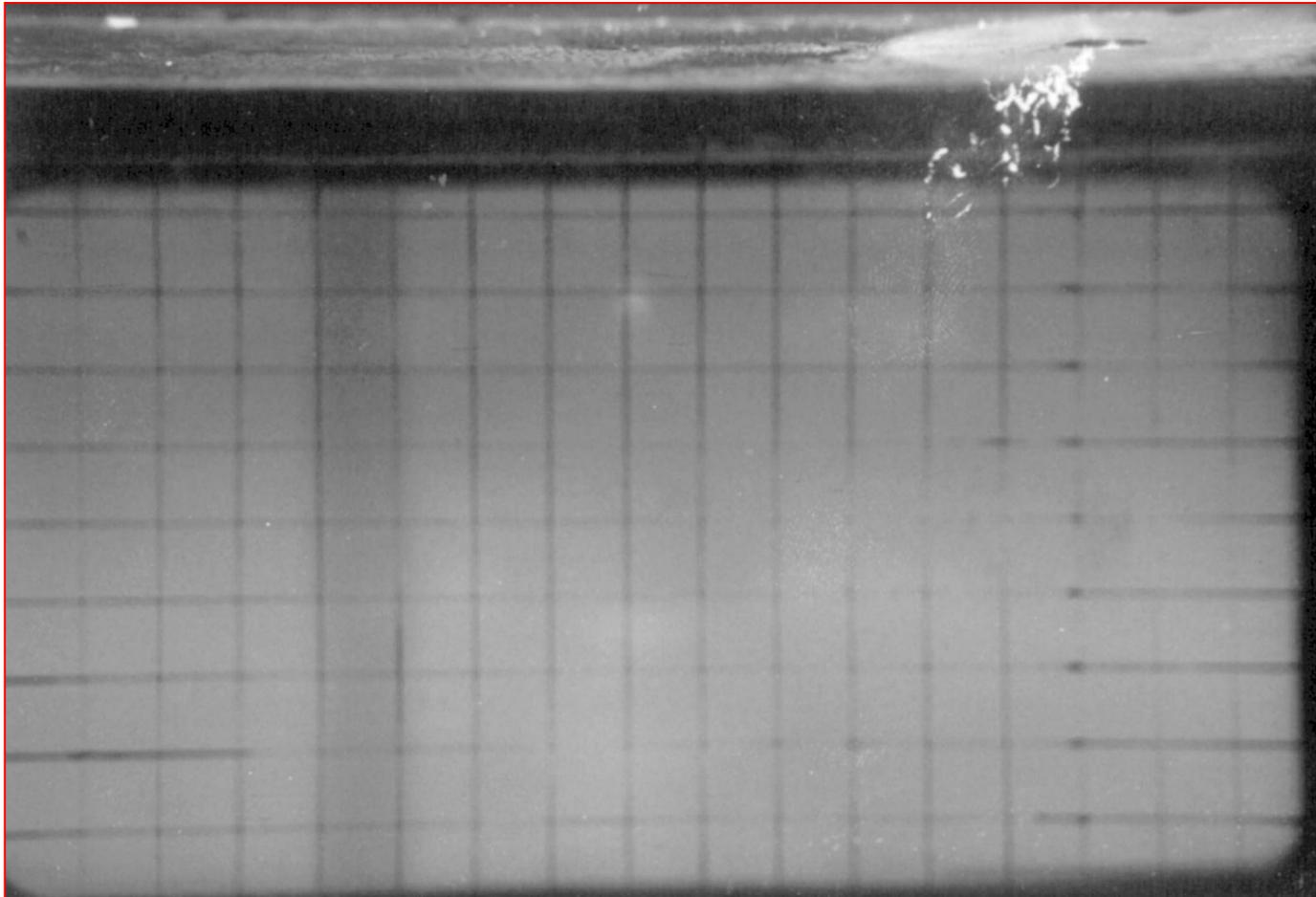
Kavitationszahl

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

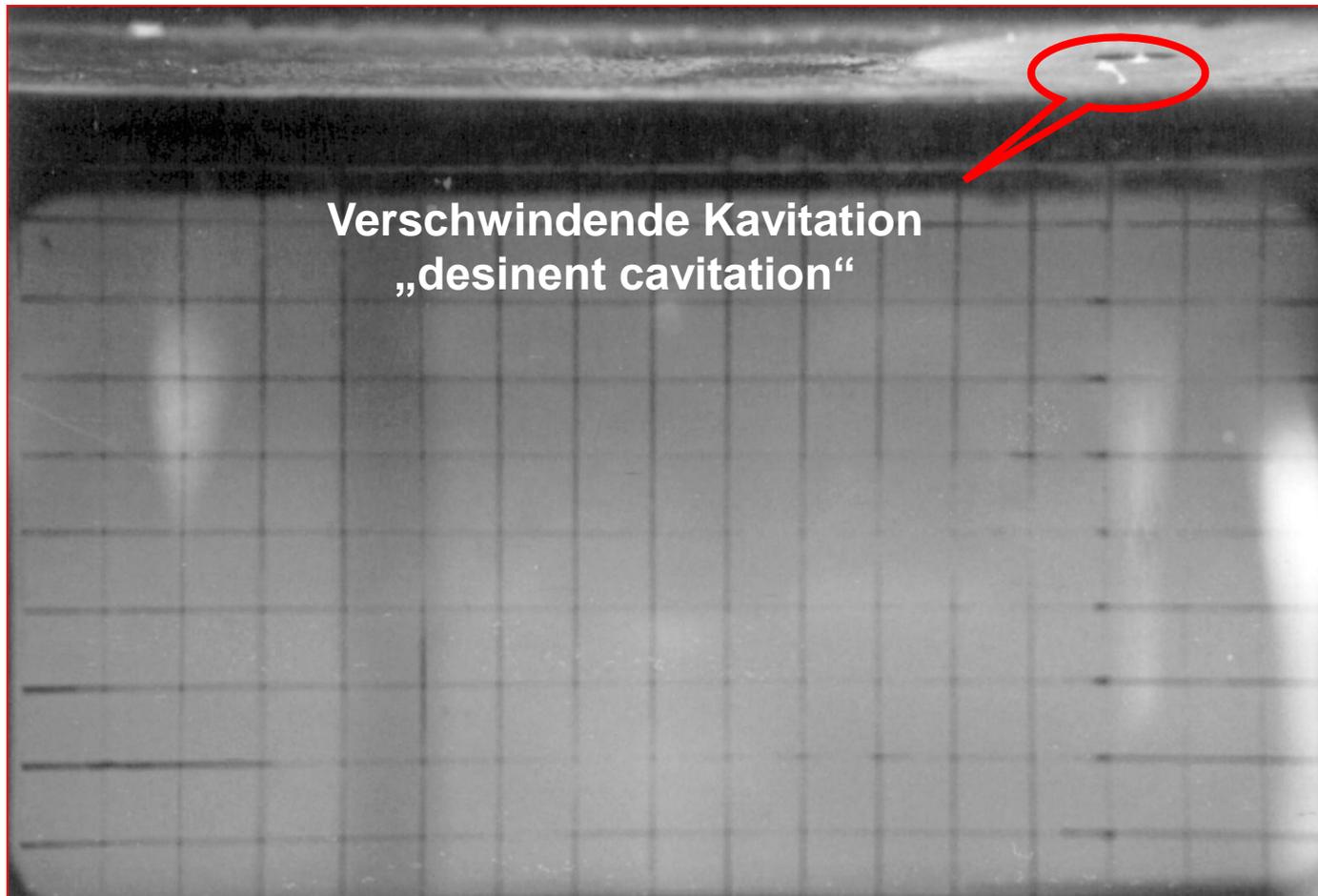
1.5.2 Beispiel Strahlvermischungszone (1)



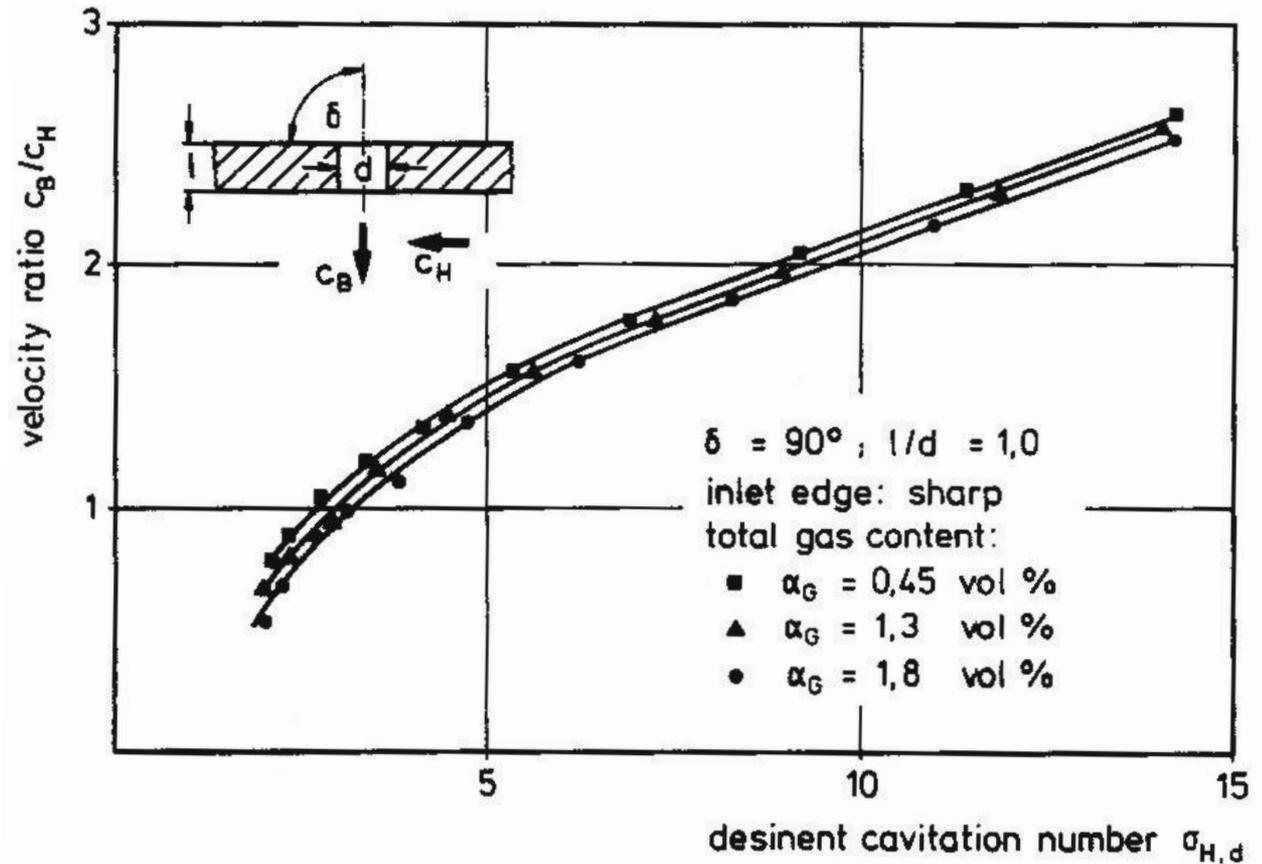
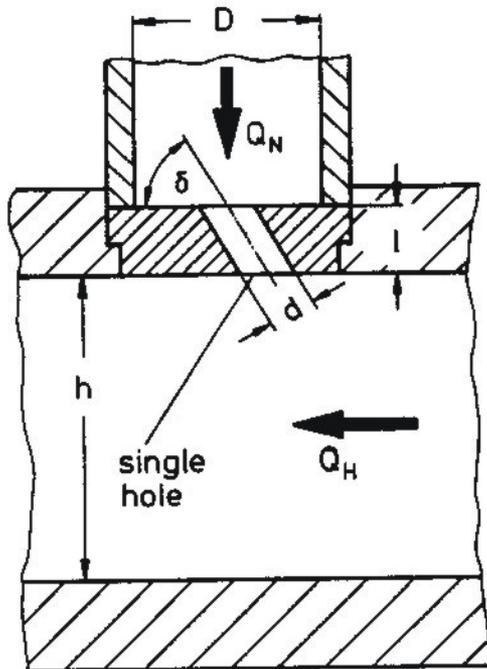
1.5.2 Beispiel Strahlvermischungszone (2)



1.5.2 Beispiel Strahlvermischungszone (3)



1.5.2 Beispiel Strahlvermischungszone (4)



Inhaltsübersicht - Kapitel 2 „Physikalische Grundlagen“



2.1 Theorie der Kavitationskeime

2.1.1 Ergebnis der statistischen Thermodynamik

2.1.2 Versuch von BRIGGS

2.1.3 Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten

2.1.4 Gleichgewichts-Radius von kugelförmigen Keimen

2.1.5 Verhalten von Keimen bei gestörtem Lösungsgleichgewicht

2.1.6 Benetzungswinkel θ an der Oberfläche von festen Wänden

2.1.7 Keimmodell „kugelförmiger Porenkeim“

2.1.8 Quasistatisches Keimverhalten

2.2 Dynamik von Kavitationsblasen

2.2.1 Differential-Gleichung des dynamischen Blasenverhaltens

2.2.2 Dynamische Stabilitätsgrenze von Kavitationskeimen

2.2.3 Mechanische Analogie zum kritischen Blasen Zustand

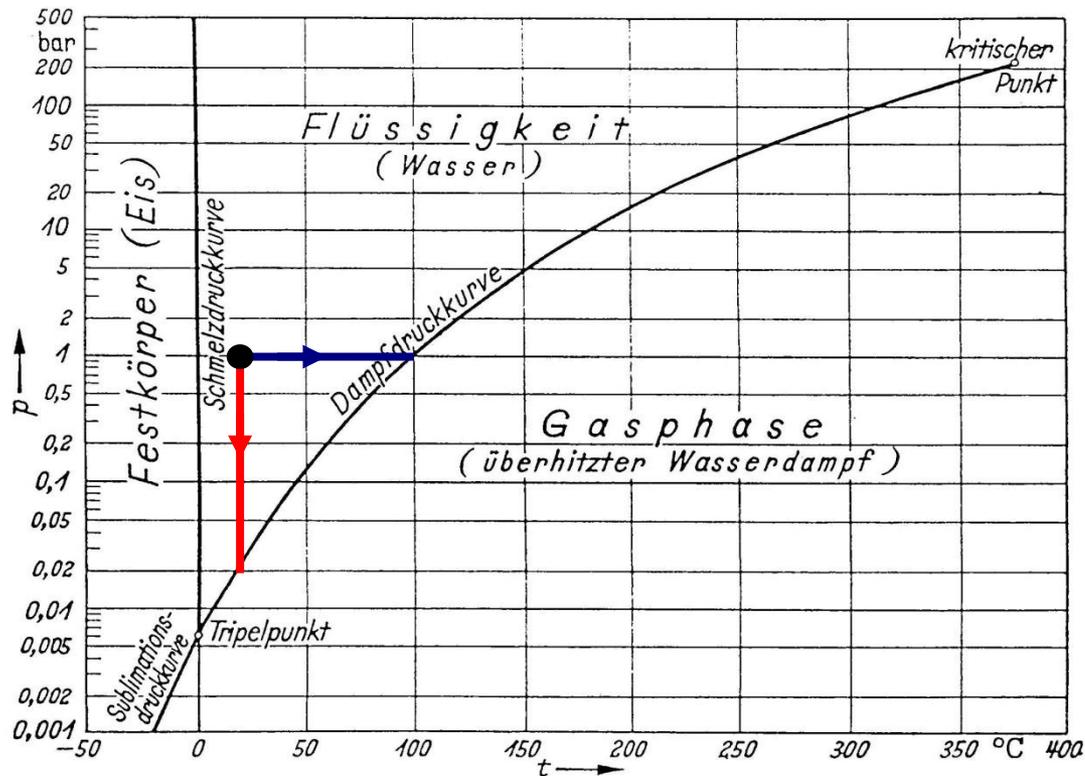
2.2.4 Kritischer Druck in Abhängigkeit vom Anfangs-Keimradius

2.2.5 Berechnetes Blasenwachstum in einer Unterdruck-Zone

2.2.6 Blasen-Implosion

2.1.1 Ergebnis der statistischen Thermodynamik

(1/2)



Dampfdruckkurve, Schmelzdruckkurve und Sublimationsdruckkurve von Wasser im p, t -Diagramm

Siedevorgang



Kochen

Druckabsenkung



z.B. in Rohrleitung

2.1.1 Ergebnis der statistischen Thermodynamik

(2/2)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

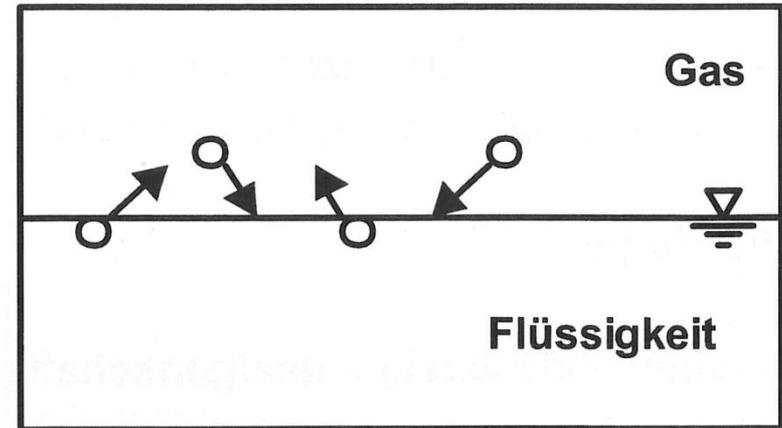
„Homogene Verdampfung“ mit:

$$N = \frac{1}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$$

$$R_{\text{Bl}} = 10^{-6} \text{ mm}$$

$$p \approx \ominus 10^3 \text{ bar}$$

für H_2O bei 27°C

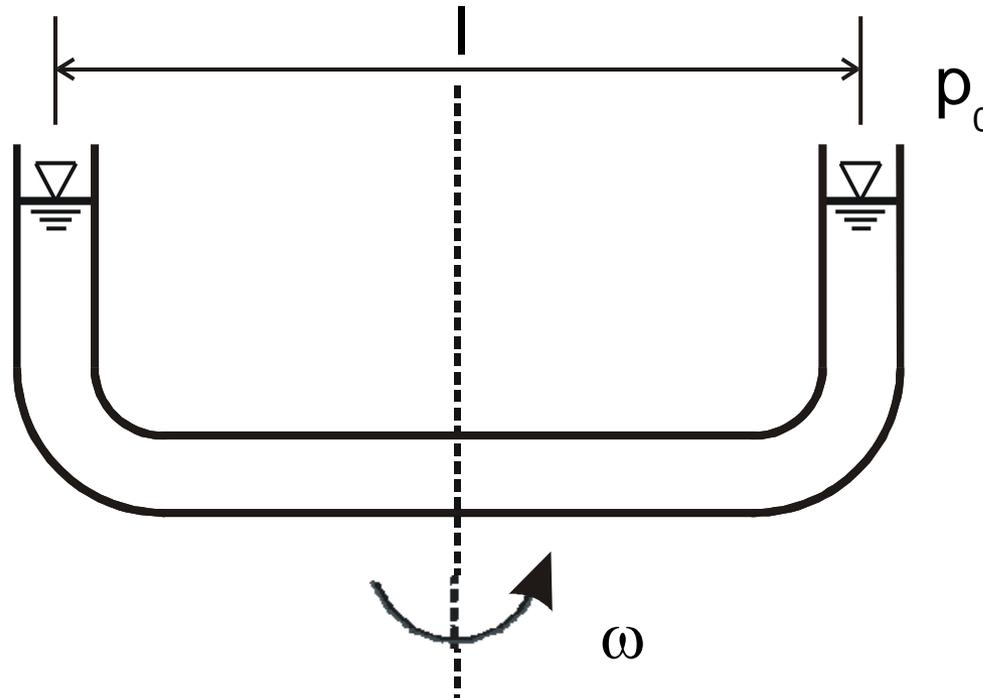


2.1.2 Versuche von BRIGGS (1950)

(1/3)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Druck in Drehachse:

$$p_{\min} = p_0 - \frac{\rho}{2} \omega^2 \frac{l^2}{4}$$

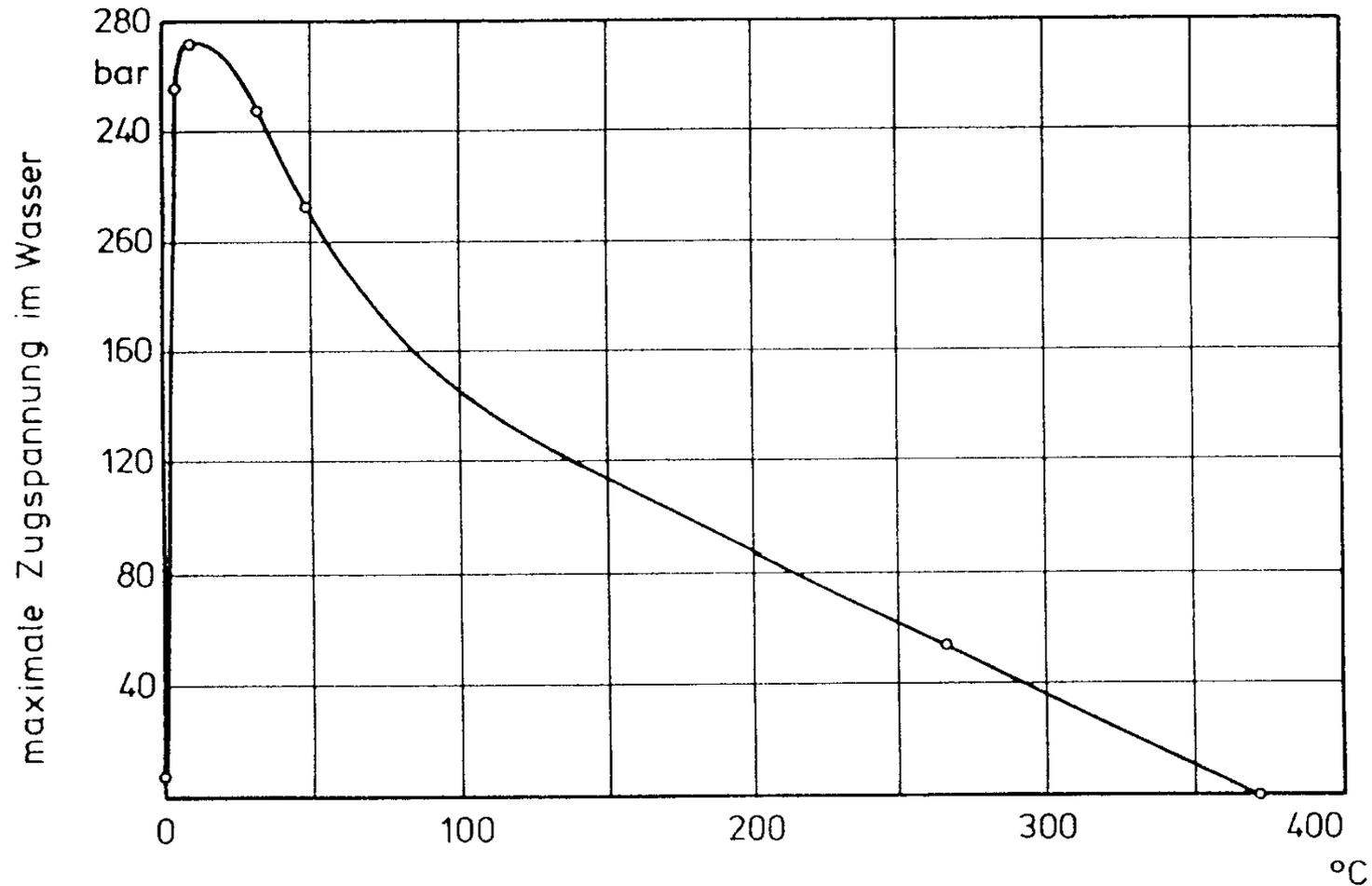
$$p_{\min} < 0, \text{ wenn } \frac{\rho}{2} \omega^2 \frac{l^2}{4} > p_0$$

2.1.2 Versuche von BRIGGS (1950)

(2/3)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





Folgerungen aus BRIGGS -Versuch

- Bei extrem reinen Flüssigkeiten (und Wänden) würde es in technischen Systemen keine Kavitation geben.
- **Reale** Flüssigkeiten enthalten Keime.

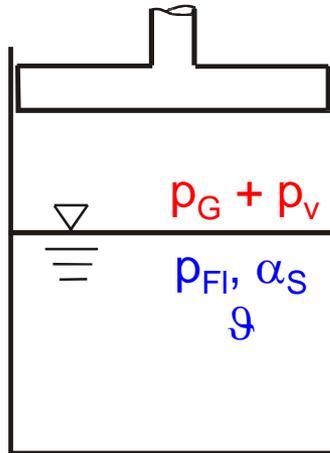
Mögliche Arten von Keimen

- freie Gaskeime
- Porenkeime an Schwebepartikeln
- Porenkeime an Wänden

Inhalt der Keime

- Fremdgase (meist Luft)
- Dampf der Flüssigkeit

2.1.3 Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten (Gesetz von HENRY)



$$\alpha_s = \frac{p_G}{H(\vartheta)}$$

α_s Sättigungs-(=Gleichgewichts-) Konzentration

p_G Gas-Partialdruck über der Flüssigkeit

$H(\vartheta)$ Henry-Koeffizient (auch Bunsen-Koeffizient)

z.B. Wasser - Luft:

- ϑ in °C
 - Gasvolumen reduziert auf 1 bar, 0°C
- $\Rightarrow p_G = 1 \text{ bar}; \vartheta = 20^\circ\text{C}: \alpha_s \cong 2,0 \text{ Vol\%}$

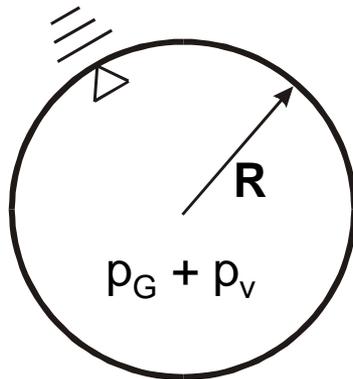
Ungleichgewicht:

$$f = \frac{\alpha}{\alpha_s} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 1,0$$

2.1.3 Gleichgewichts-Radius von kugelförmigen Keimen

1.) Druckgleichgewicht

$p_{FI}, \vartheta, \alpha_{\infty}$



$$p_i = p_G + p_v = p_{FI} + \frac{2 \cdot \tau}{R}$$

p_G Gas - Partialdruck

p_v Dampfdruck bei Temperatur ϑ

τ Oberflächenspannung

R Keimradius

$$p_G = \alpha_{\infty} \cdot H(\vartheta)$$

$H(\vartheta)$ Henry-Koeffizient bei Temperatur ϑ

α_{∞} Konzentration der gelösten Luft

2.) Lösungsgleichgewicht

Es folgt

$$R_{GI} = \frac{2 \cdot \tau}{\alpha_{\infty} \cdot H(\vartheta) + p_v - p_{FI}}$$

2.1.4 Gleichgewichts-Radius von kugelförmigen Keimen

(2/2)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

z.B.: H_2O

$$\vartheta = 20 \text{ °C}$$

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

$$p_v(20\text{°C}) = 0,0234 \text{ bar}$$

$$\alpha_\infty = 2,0 \text{ Vol\%}$$

$$\tau = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$$

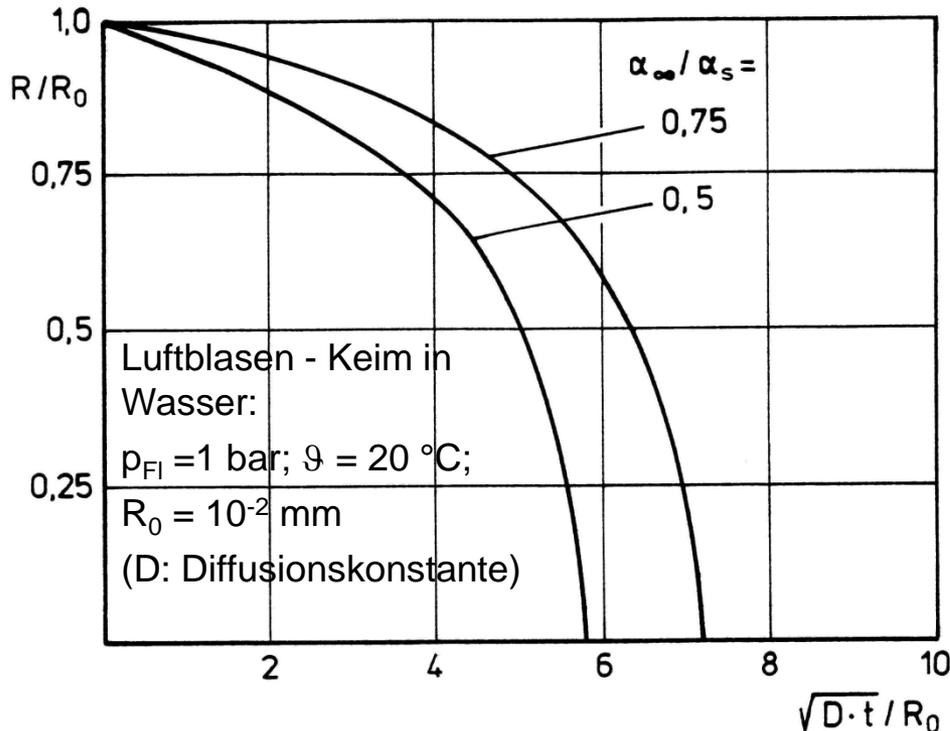
$$\Rightarrow R_{\text{GL}} = 0,062 \text{ mm}$$

2.1.5 Verhalten von Keimen bei gestörtem Lösungsgleichgewicht

(1/2)



a.) Störung + Δp_{FI}



1.) Druck-GG:

p_G steigt;

R wird kleiner.

2.) Lösungs-GG:

Gas diffundiert in die Flüssigkeit;

R wird noch kleiner

$\Rightarrow \frac{2 \cdot \tau}{R}$ wird größer;

d.h. selbstverstärkender Prozess;

Keim verschwindet

$$\text{z.B.: } D = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; \quad \frac{\sqrt{D \cdot t}}{R_0} = 10 \Rightarrow t = 5 \text{ s}$$

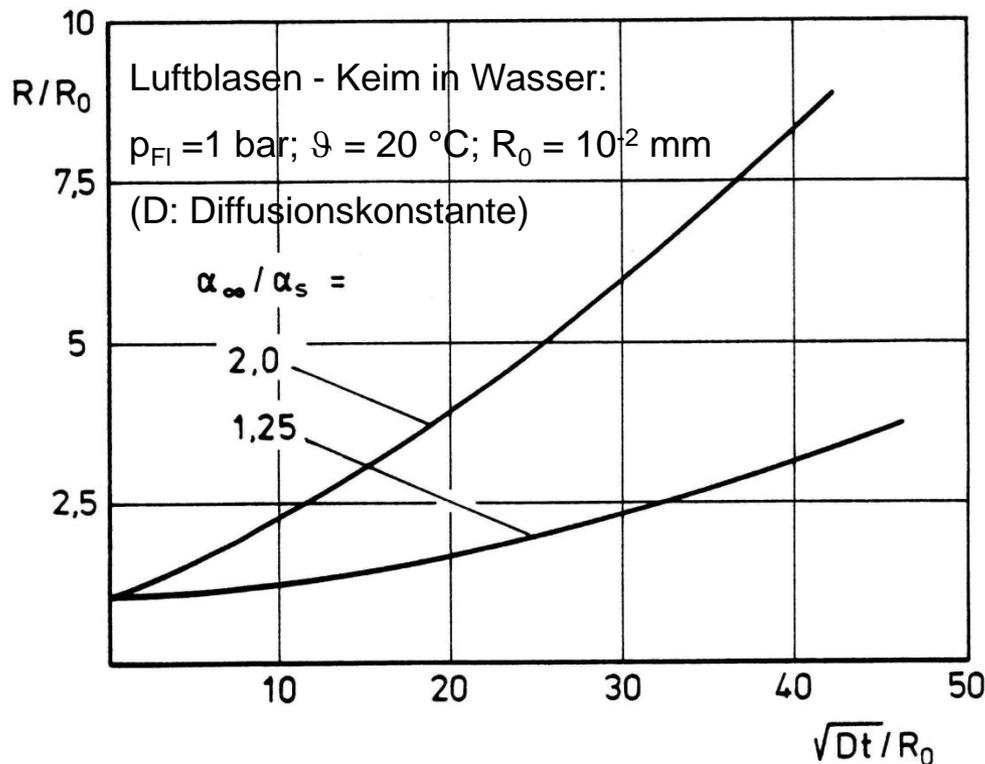
2.1.5 Verhalten von Keimen bei gestörtem Lösungsgleichgewicht

(2/2)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

b.) Störung - Δp_{FI}



⇒ Keim erfährt Auftrieb. Auftriebsgeschwindigkeit

1.) Druck-GG:

p_G fällt;

R wird größer.

2.) Lösungs-GG:

Gas diffundiert in die Blase;

R wird noch größer

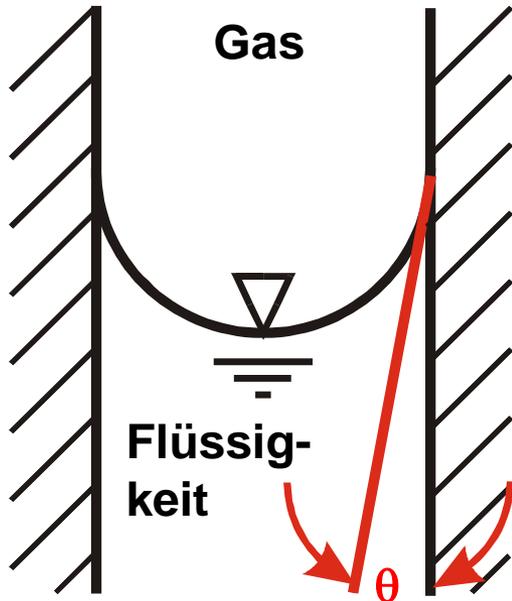
⇒ $\frac{2 \cdot \tau}{R}$ wird kleiner;

d.h. selbstverstärkender Prozess;

Keim wächst immer weiter

$$w_A = \frac{2}{9} \frac{g \cdot R_{BI}^2}{\nu}$$

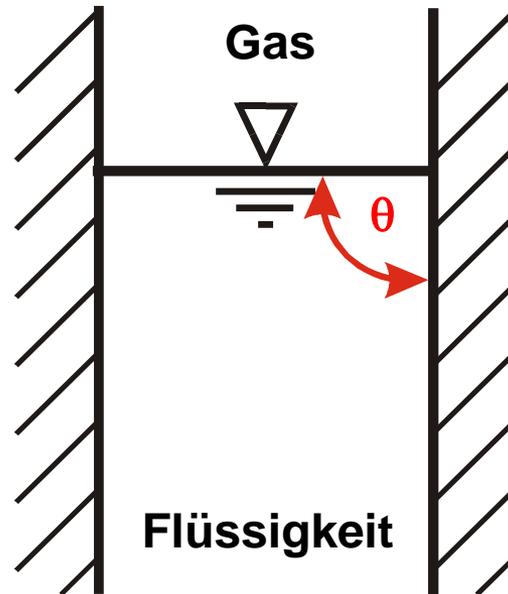
2.1.6 Benetzungswinkel θ an der Oberfläche von festen Wänden



„hydrophil“

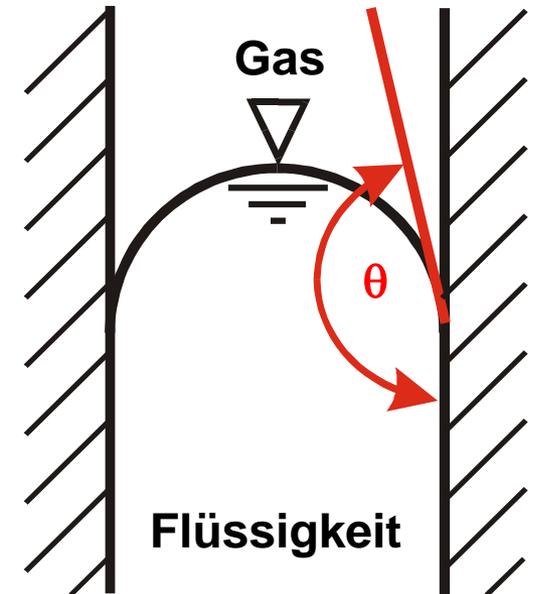
$$\theta < \frac{\pi}{2}$$

z.B.: Wasser – Luft - Glas



„neutral“

$$\theta = \frac{\pi}{2}$$



„hydrophob“

$$\theta > \frac{\pi}{2}$$

z.B.: Hg - Luft - Glas

2.1.7 Keimmodell „kugelförmiger Porenkeim“

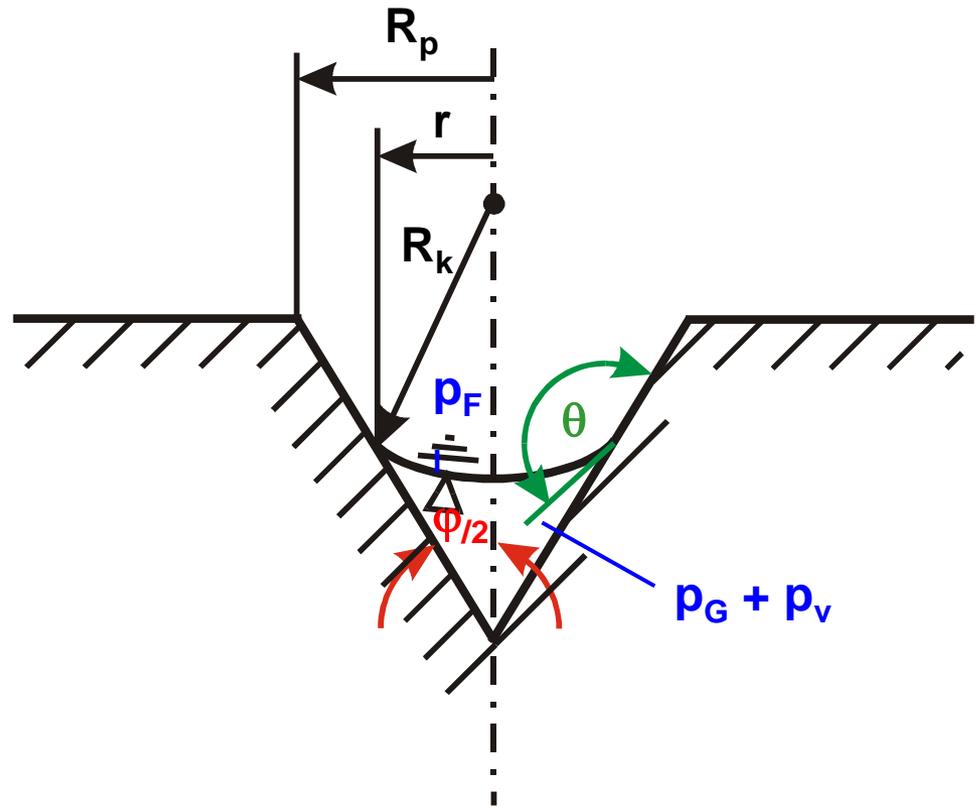
hydrophobes Verhalten:

$$\theta > \frac{\pi}{2}$$

$$R_k = \frac{r}{\left| \cos\left(\theta - \frac{\varphi}{2}\right) \right|}$$

$$\begin{aligned} p_G + p_v &= p_{FL} \ominus \frac{2 \cdot \tau}{R_k} \\ &= p_{FL} - \left| \cos\left(\theta - \frac{\varphi}{2}\right) \right| \cdot \frac{2 \cdot \tau}{r} \end{aligned}$$

$$r_{GL} = \frac{2 \cdot \tau \cdot \left| \cos\left(\theta - \frac{\varphi}{2}\right) \right|}{p_{FL} - p_v - \alpha_\infty \cdot H(\vartheta)}$$

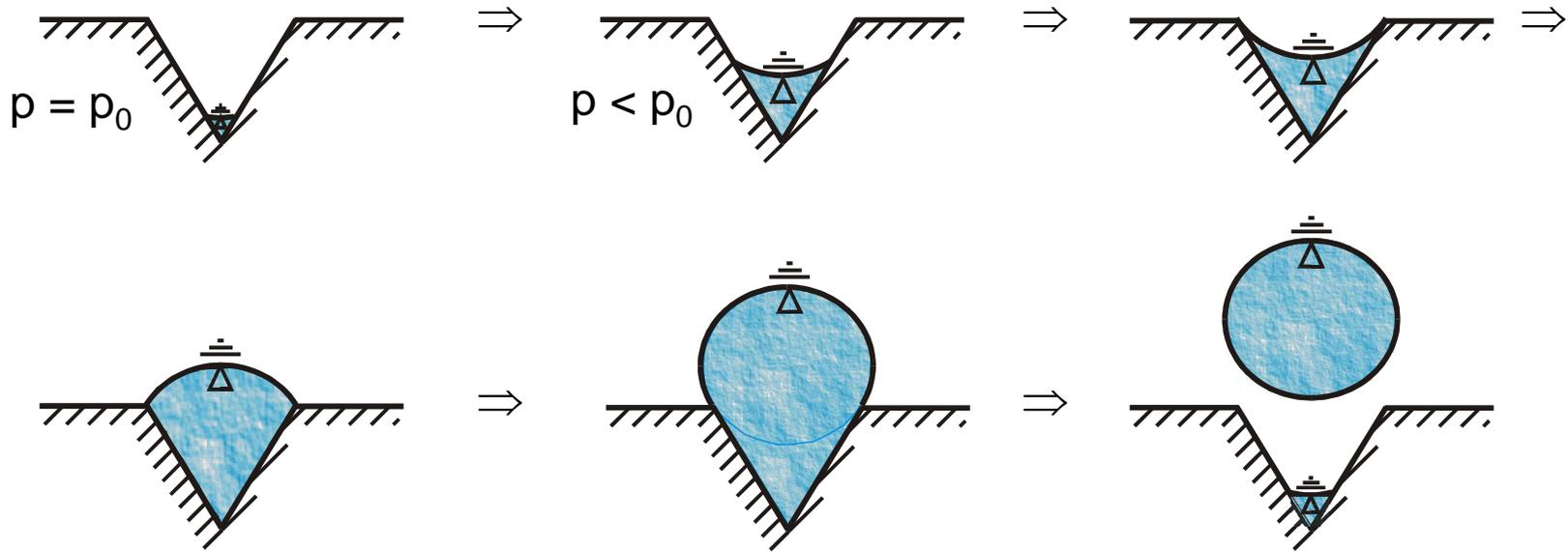


$$r_{GL, \max} = R_p$$

2.1.7 Keimmodell „kugelförmiger Porenkeim“

+ Δp_{FL} : neues GG mit kleinerem Gasvolumen

- Δp_{FL} : neue Grenzfläche bis $r = R_p$
 \Rightarrow dann löst Blase ab



ab hier wie 1. Modell

2.1.7 Keimmodell „kugelförmiger Porenkeim“

⇒ In Flüssigkeiten können Keime nur über längere Zeit existieren, wenn sie sich an Vertiefungen einlagern.

Keime in

	ruhender Flüssigkeit	strömender Flüssigkeit
Porenkeime	X	X
Mikroblasen		X

The diagram shows a 2x2 grid. The top row is labeled 'Porenkeime' and the bottom row 'Mikroblasen'. The left column is 'ruhender Flüssigkeit' and the right column is 'strömender Flüssigkeit'. In the 'Porenkeime' row, there is an 'X' in the 'ruhender Flüssigkeit' cell and another 'X' in the 'strömender Flüssigkeit' cell, connected by a horizontal arrow pointing right. In the 'Mikroblasen' row, there is an 'X' in the 'strömender Flüssigkeit' cell, connected to the 'X' above it by a vertical arrow pointing down.

⇒ Für Kavitationsereignisse müssen nur Mikroblasen betrachtet werden.

2.1.8 Quasistatisches Keimverhalten

(1/5)



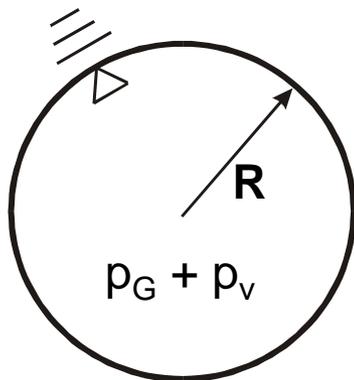
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Annahmen:**
- 1.) $m_G = \text{const.}$ (keine Diffusion)
 - 2.) \dot{R} ausreichend klein (keine Trägheitskräfte)
 - 3.) $\vartheta_G = \text{const.}; p_v = \text{const.}$ (isotherme Änderung)
 - 4.) kugelförmige Keime

Druckgleichgewicht:

$$p_{FL} - p_v = p_G - \frac{2 \cdot \tau}{R}$$

$p_{Fl}, \vartheta, \alpha_\infty$



$$p_G \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = m_G \cdot R_G \cdot \vartheta_G = \text{const.}$$

$$p_G = \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \cdot p_{G0}$$

$$\Rightarrow p_{FL} - p_v = \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \cdot p_{G0} - \frac{2 \cdot \tau}{R}$$