



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

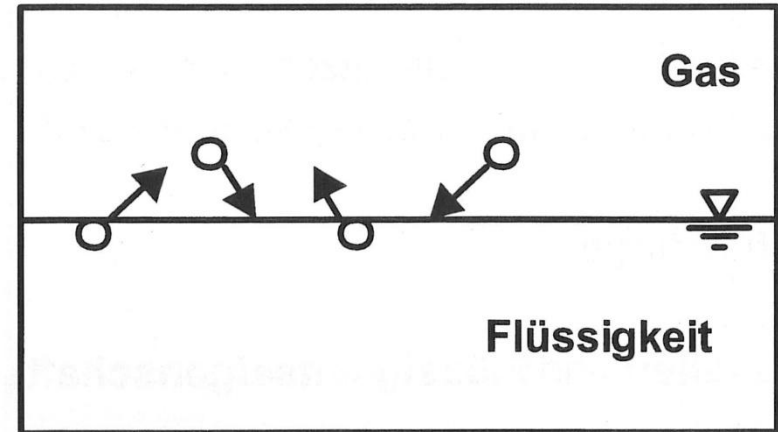
„Homogene Verdampfung“ mit:

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

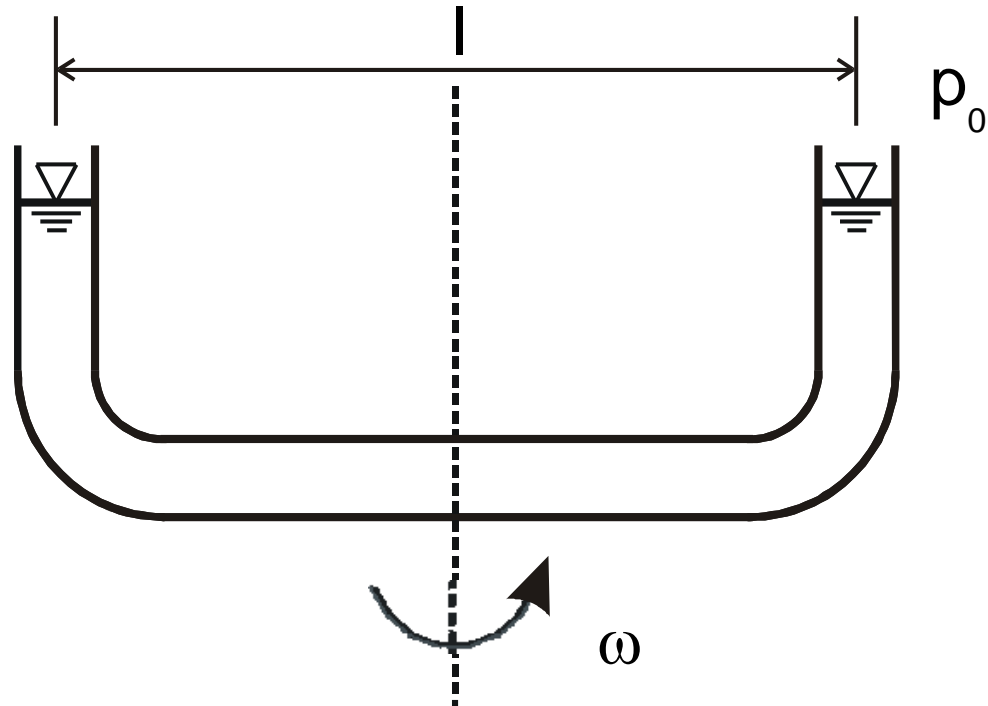
$$R_{\text{Bl}} = 10^{-6} \text{ mm}$$

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

für H_2O bei 27°C



2.1.2 Versuche von BRIGGS (1950) (1)

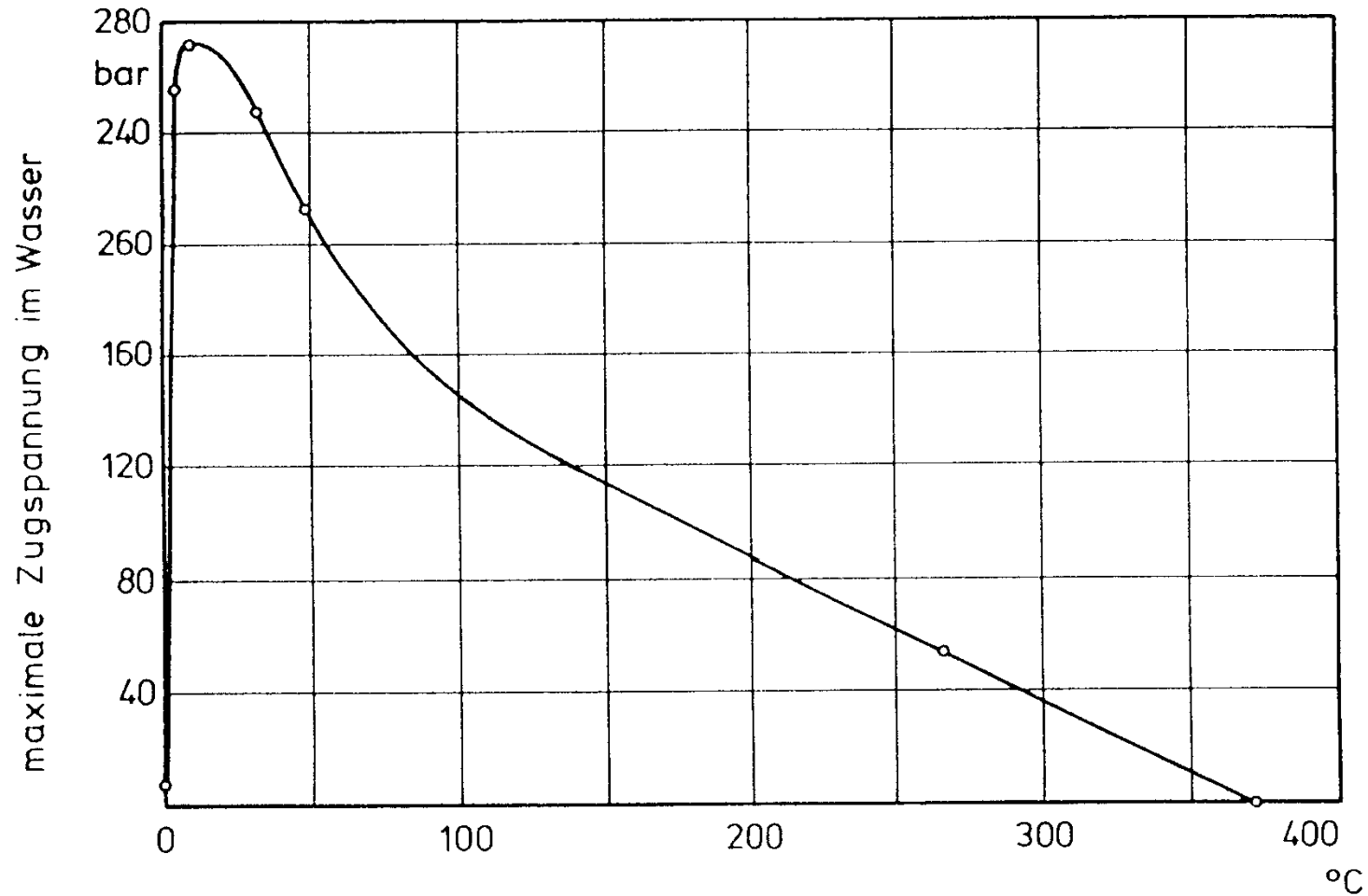


Druck in Drehachse:

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

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

2.1.2 Versuche von BRIGGS (1950) (2)



2.1.2 Versuche von BRIGGS (1950) (2)



Folgerungen aus BRIGGS -Versuch

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

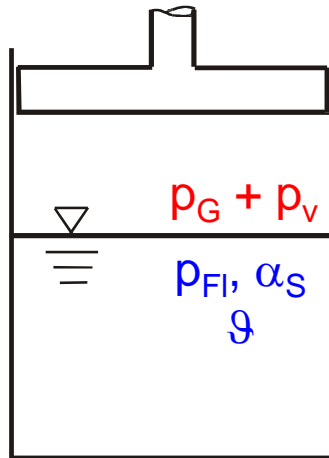
Mögliche Arten von Keimen

- 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
- $\Rightarrow p_G = 1 \text{ bar}; \vartheta = 20^\circ\text{C}: \alpha_S \cong 2,0 \text{ Vol\%}$

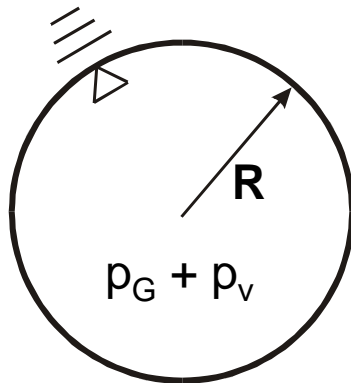
Ungleichgewicht:

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

2.1.3 Gleichgewichts-Radius von kugelförmigen Keimen (1)

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)



z.B.: H_2O

$$\vartheta = 20 \text{ °C}$$

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

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

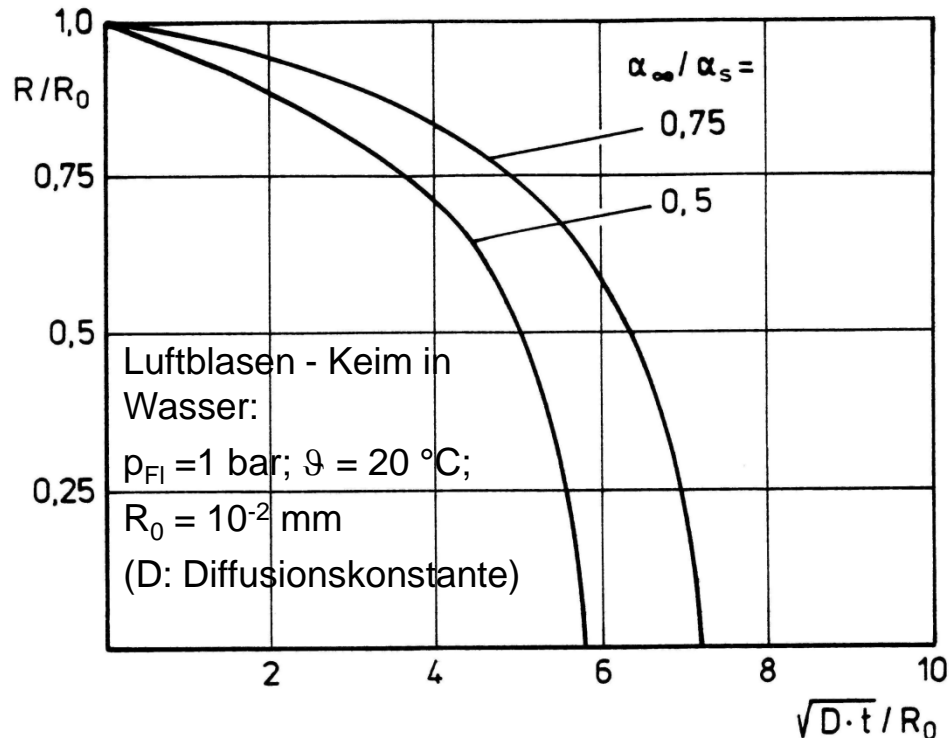
$$\alpha_\infty = 2,0 \text{ Vol\%}$$

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

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

2.1.5 Verhalten von Keimen bei gestörtem Lösungsgleichgewicht (1)

a.) Störung + Δp_{FI}



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

1.) Druck-GG:

p_G steigt;
 R wird kleiner.

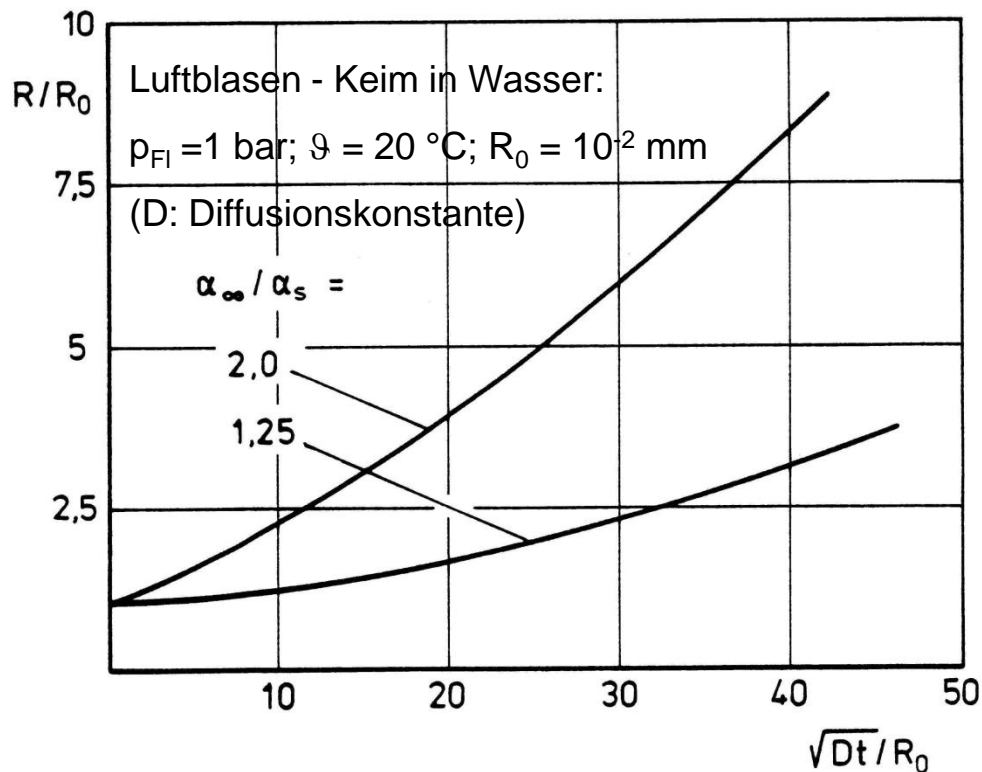
2.) Lösungs-GG:

Gas diffundiert in die Flüssigkeit;
 R wird noch kleiner
 $\Rightarrow \frac{2 \cdot \tau}{R}$ wird größer;
 d.h. selbstverstärkender Prozess;

Keim verschwindet

2.1.5 Verhalten von Keimen bei gestörtem Lösungsgleichgewicht (2)

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

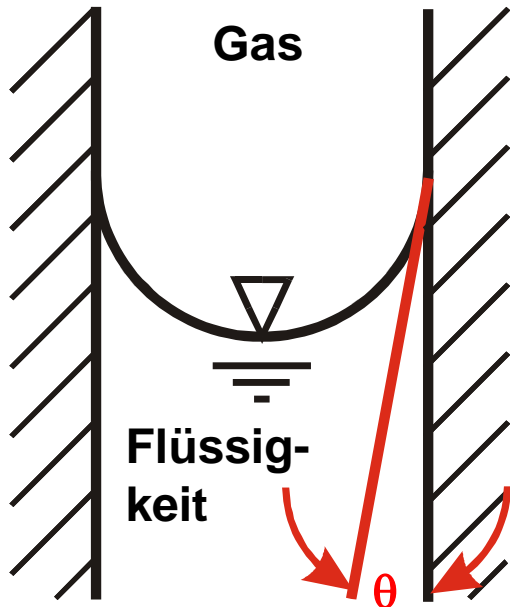
⇒ $\frac{2 \cdot \tau}{R}$ wird kleiner;

d.h. selbstverstärkender Prozess;

Keim wächst immer weiter

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

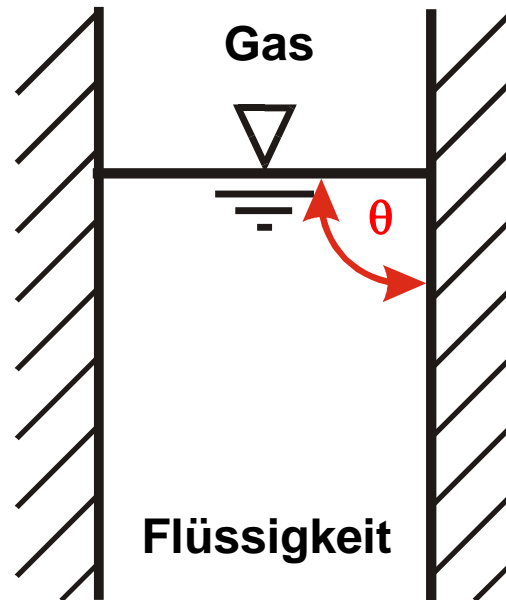
2.1.6 Benetzungswinkel θ an der Oberfläche von festen Wänden



„hydrophil“

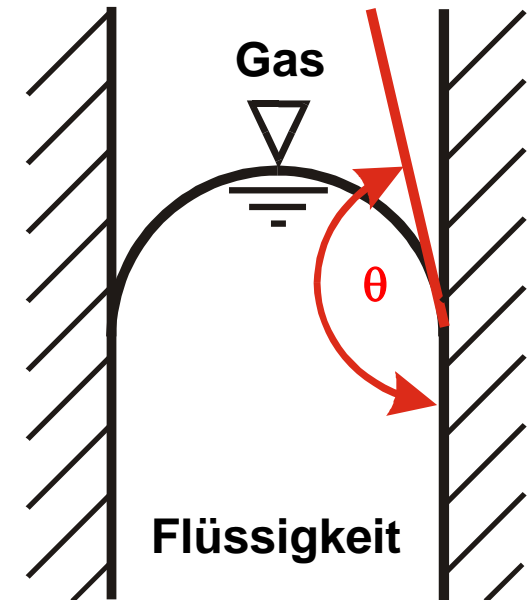
$$\theta < \frac{\pi}{2}$$

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“ (1)

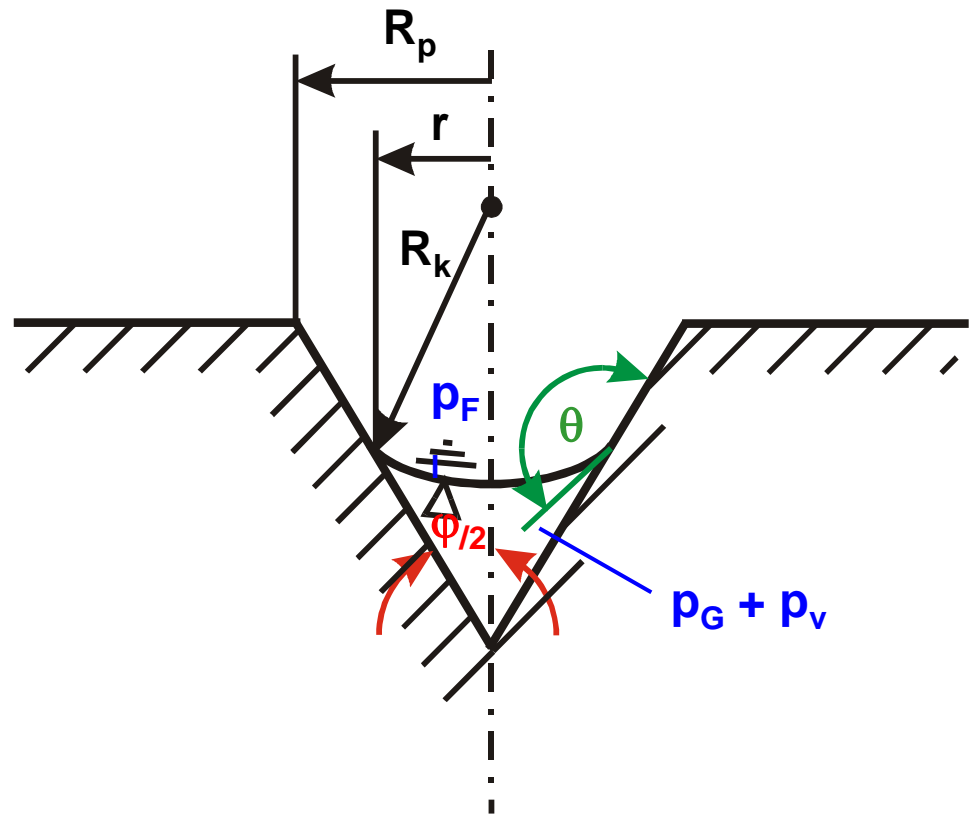
hydrophobes Verhalten:

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

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

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

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

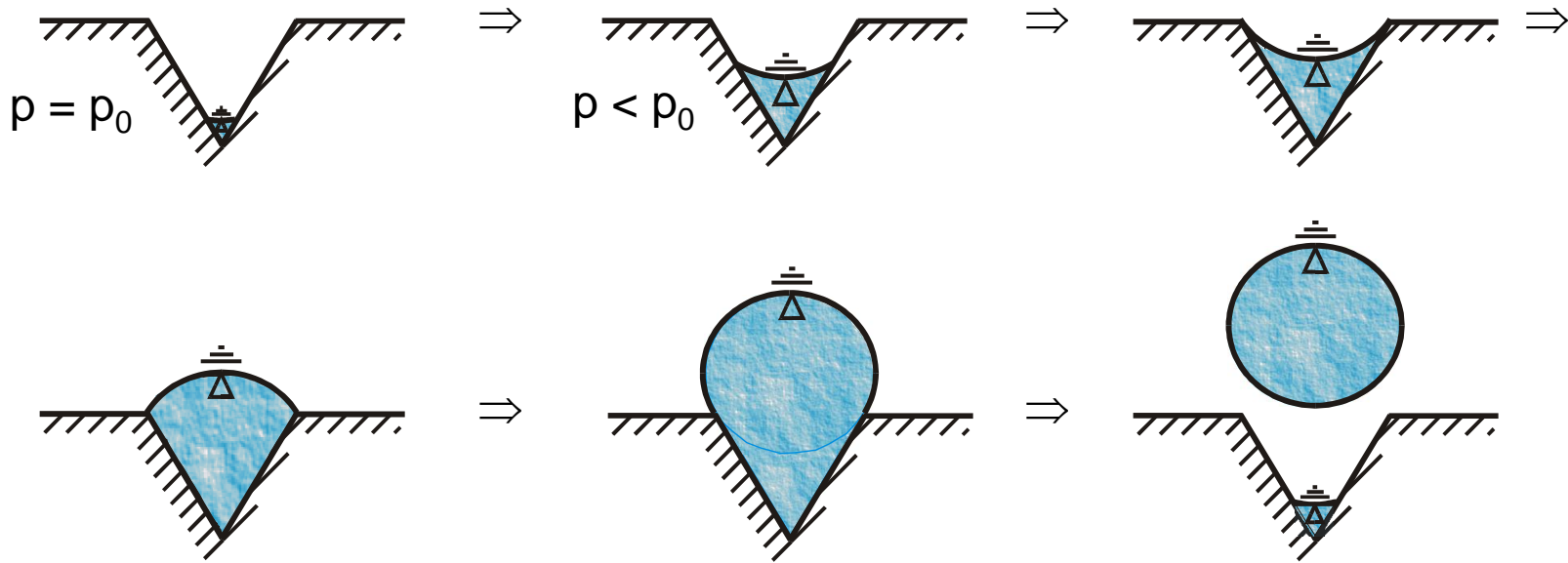


$$r_{GL,max} = R_p$$

2.1.7 Keimmodell „kugelförmiger Porenkeim“ (2)

+ 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“ (3)

⇒ 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.