

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



UNIVERSITÄT ROSTOCK, MSF, LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMASCHINEN

# Wintersemester 2015/2016

## Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- ▶ Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)
- ▶ Strömungstechnische Grundlagen (Vorlesung 2)
  - Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
  - Turbulenzmodellierung
  - Grenzen der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten
- ▶ **Kavitation** (Vorlesungen 3,4)
- ▶ Strömungsmaschinen mit Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung, Betrieb)  
(Vorlesung 5,6,7,8)
- ▶ Strömungsmaschinen ohne Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung)  
(Vorlesung 9)
- ▶ Strömungstechnische Optimierung mit numerischen Methoden (Vorlesung 10)



- ▶ Strömungswandler (Vorlesung 11)
- ▶ spezielle Bauformen – Seitenkanalpumpen, Schraubenspindelpumpen (Vorl. 12)
- ▶ spezielle Bauformen – Voith-Schneider-Propeller (Vorlesung 13)
- ▶ Anwendung bionischer Methoden und Herzunterstützungssysteme (Vorl. 14)



# Grundlagen der Kavitation

- lat. cavitare = aushöhlen
- Kavitation ist die teilweise Verdampfung von Flüssigkeit in einem durchströmten System
- Für das „Aufreißen“ der Flüssigkeit muss die wirkende Zugspannung überwunden werden (Überwindung der Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen).
- Der Betrag der dafür notwendigen Kräfte hängt von sehr vielen Parametern ab (gemessen wurden Zugspannungen bis -250 bar).

Für das grundlegende Verständnis von Kavitation sind zwei physikalische Phänomene von Bedeutung:

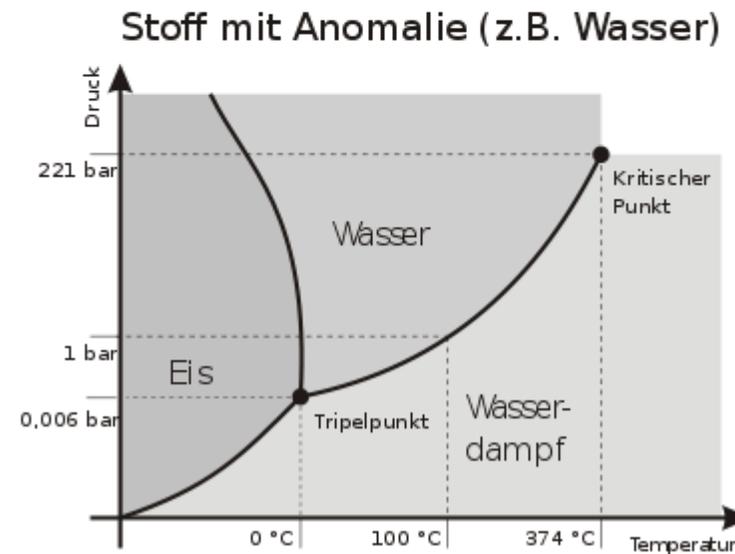
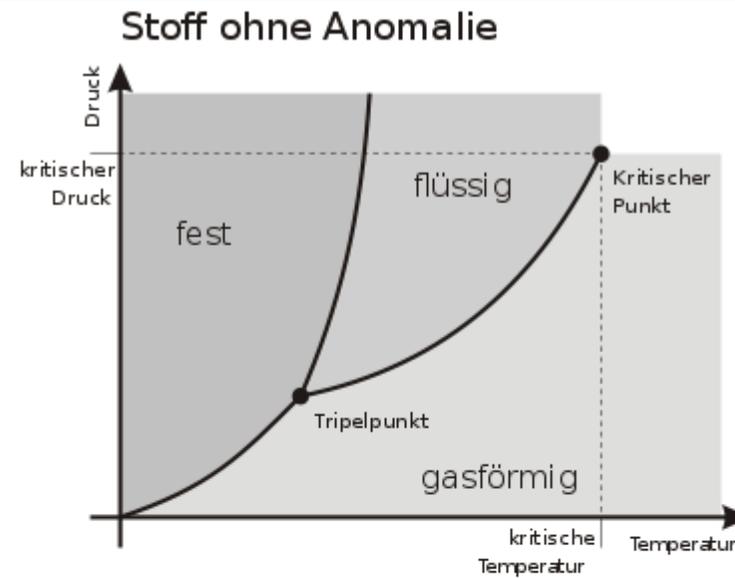
**1)** Energieerhaltungssatz in der Form

$$\frac{\rho \cdot c^2}{2} + p + \rho \cdot g \cdot h = \text{const.}$$

(Beziehung zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit)

**2)** Abhängigkeit des Sättigungsdruckes (Dampfdruckes) von der Sättigungstemperatur

# Aggregatzustand abhängig von Druck und Temperatur

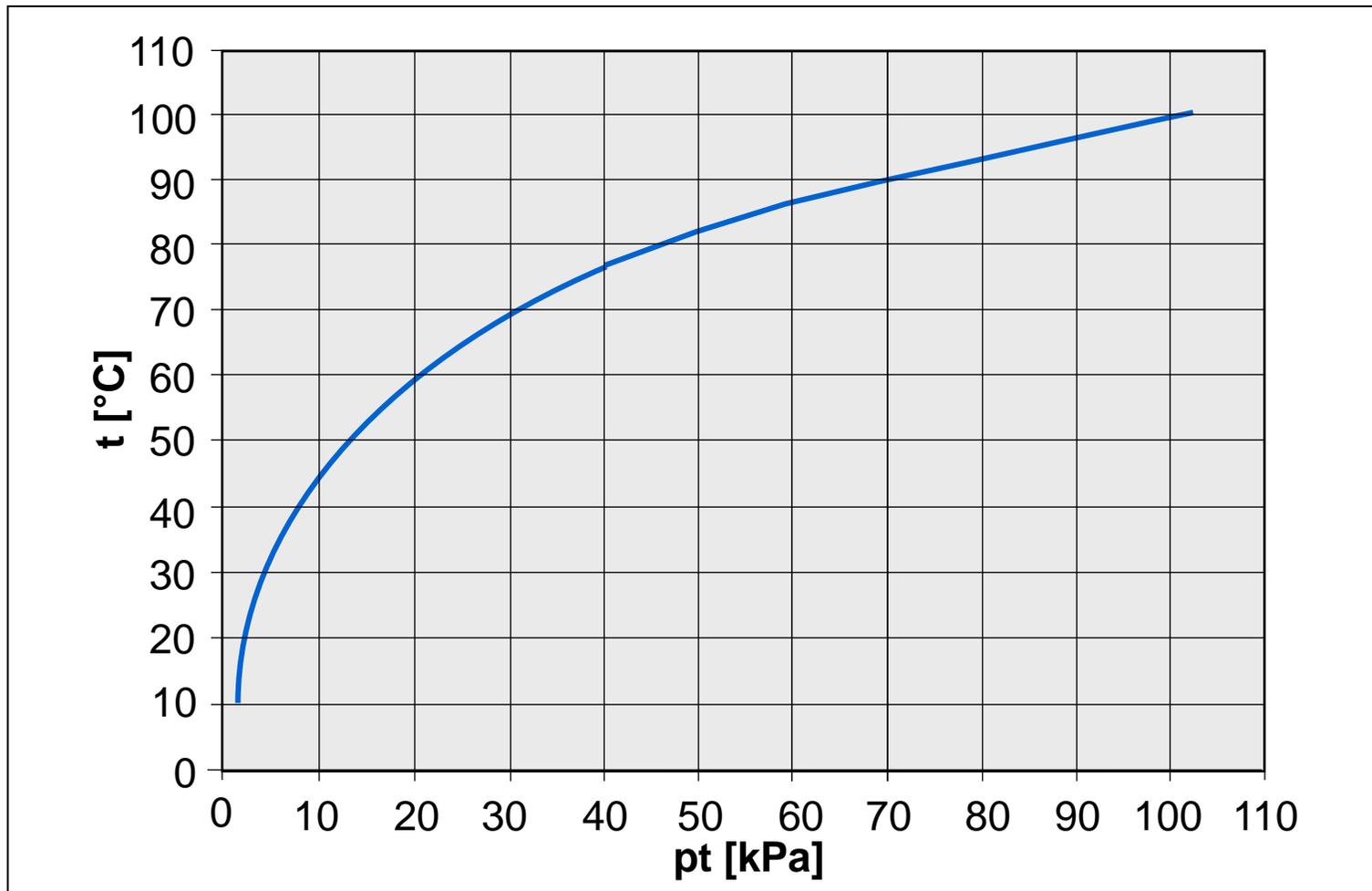


aus WIKIPEDIA





# Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur



Tafelbild



- ▶ Blasen kavitation
- ▶ Schicht kavitation
  
- ▶ Strahl kavitation
- ▶ Schaufelspitzenwirbel kavitation

Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbilder.

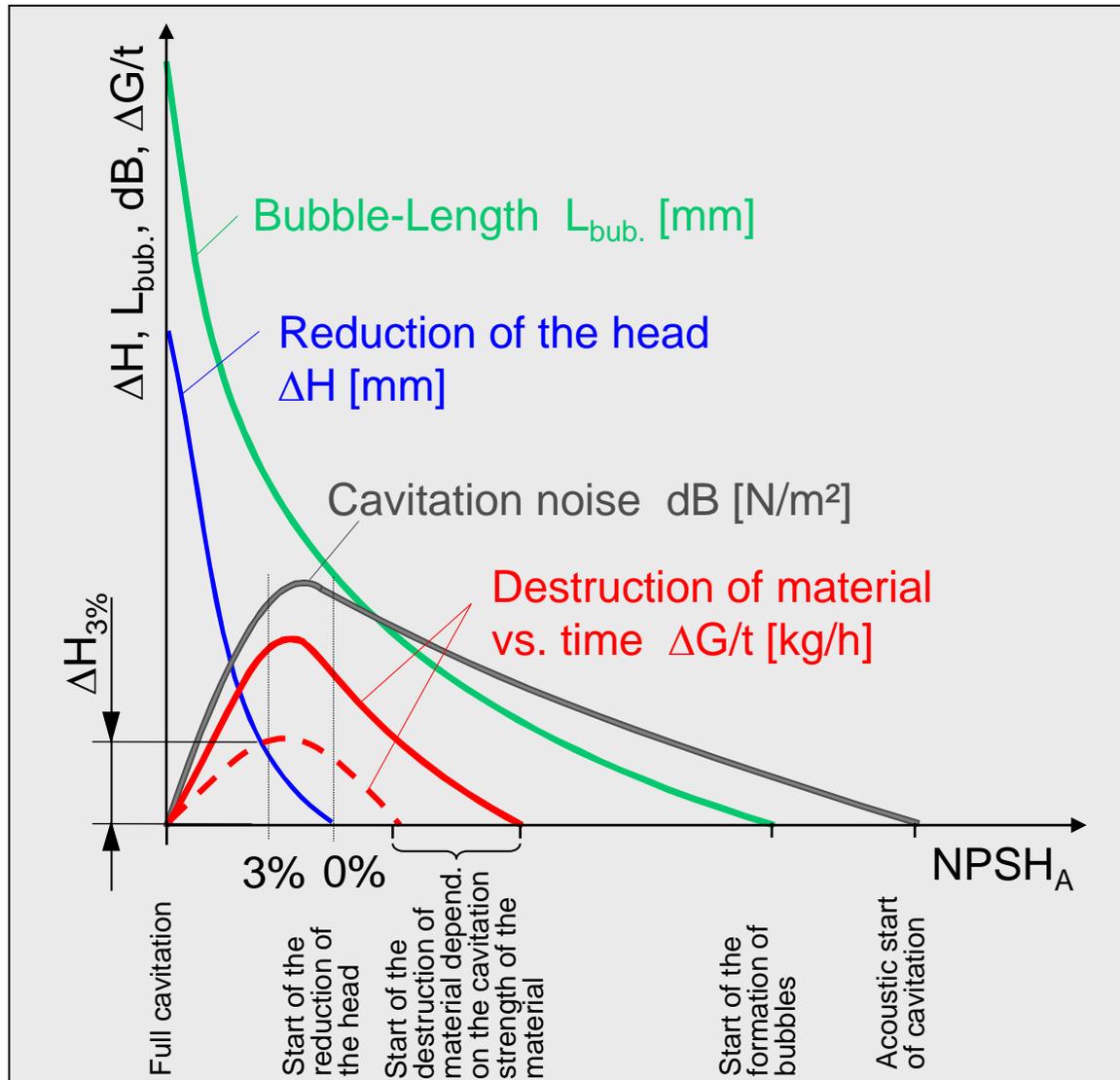


Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbilder.

Kavitation ist in allen Situationen möglich, in denen eine Flüssigkeit beschleunigt wird:

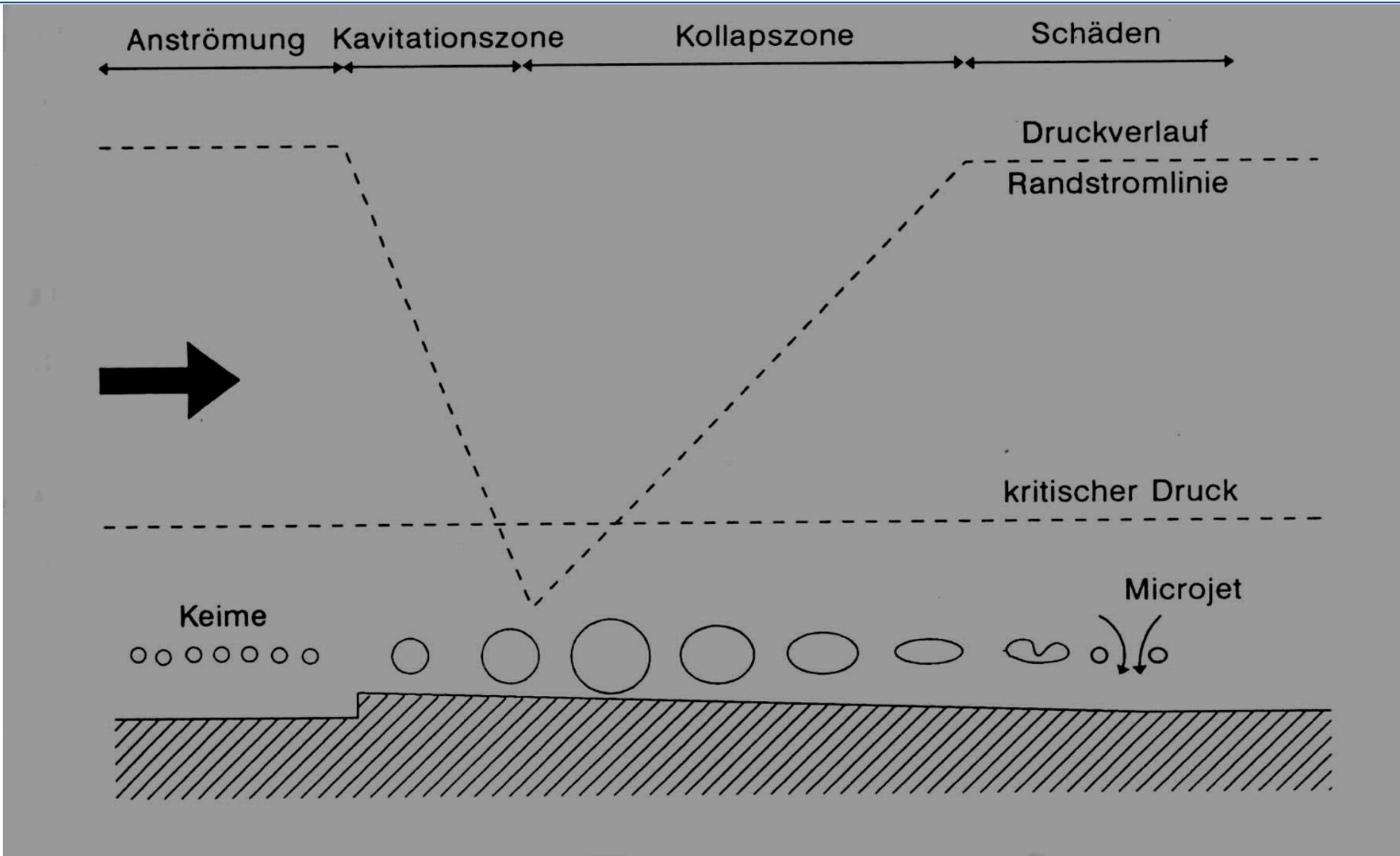
- ▶ Rohre
  - Einspritzleitung bei Fahrzeugen
  - Krümmer
  - Feuerlöschleitung von Pumpen
- ▶ Armaturen - Ventile
  - Schieber
- ▶ Turbomaschinen (Pumpen, Turbinen, Propeller)

# Auswirkungen von Kavitation in Strömungsmaschinen



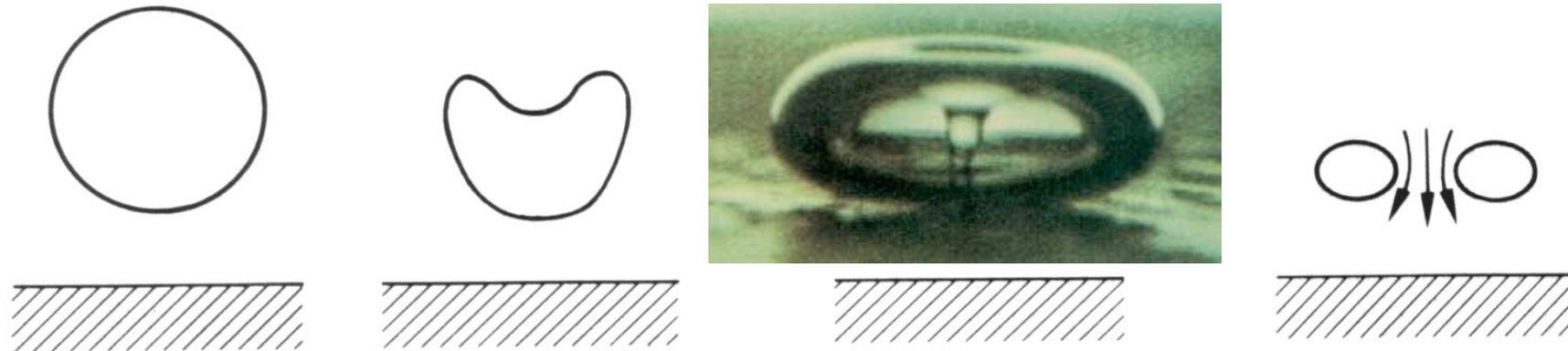
Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von  $NPSH_A$  bei konstanter Drehzahl und konstantem Förderstrom (nach Florjanic, D.; Gülich, J. und Wesche.: „Beurteilungskriterien für die Wahl des Zulaufdruckes von Kreiselpumpen“. 3R International, 27 [1988], Heft 7, S. 502/509)

entnommen aus Pfeiderer, C.; Petermann, H.: „Strömungsmaschinen“, 6. Auflage

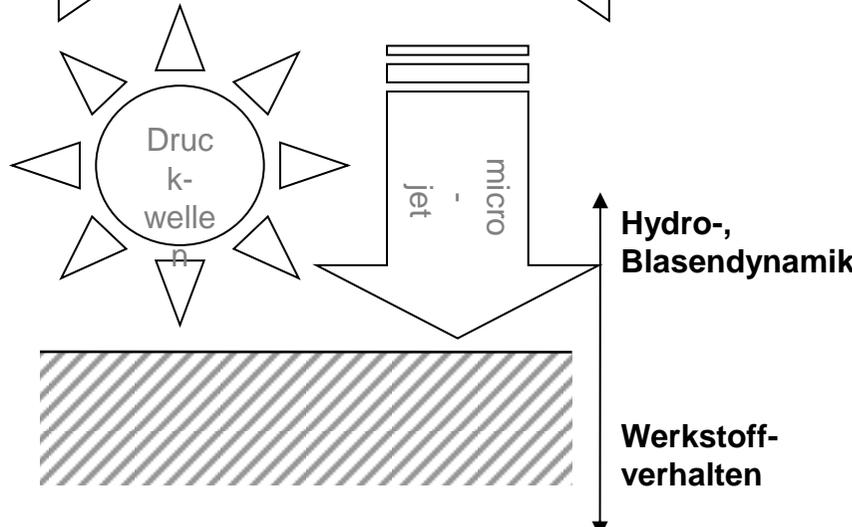
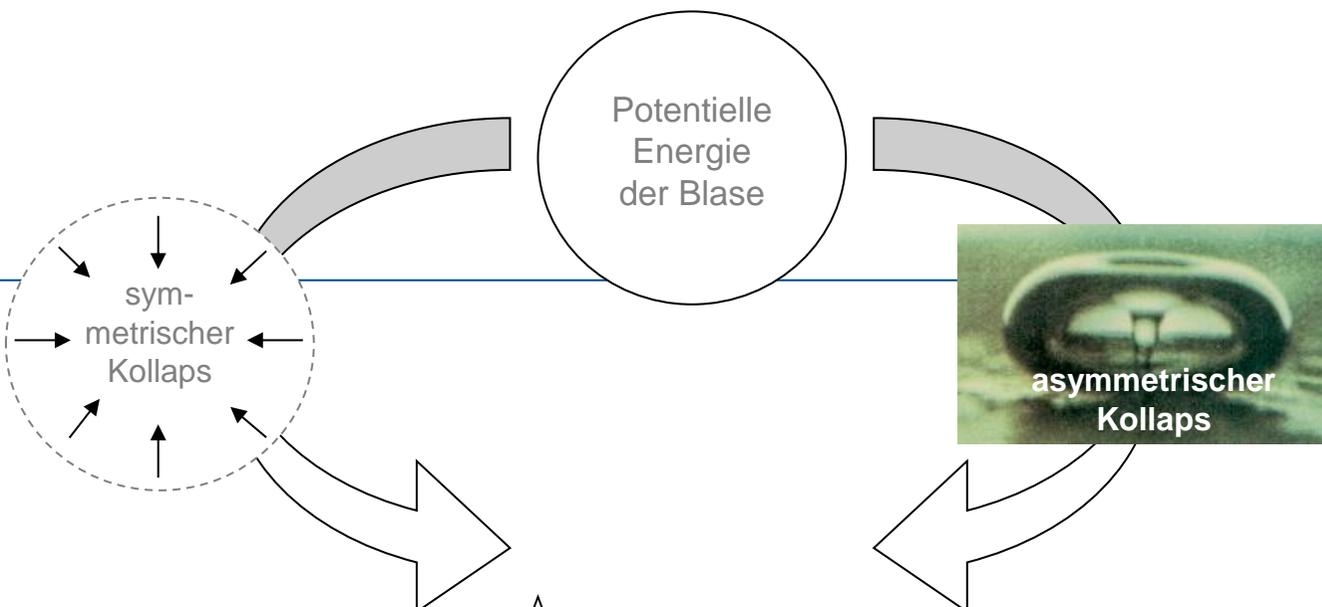


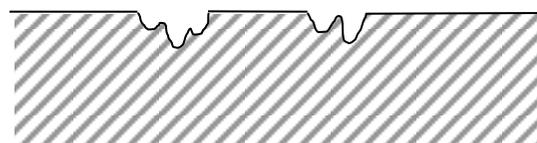
aus einem Weiterbildungsvortrag von Herrn Dr. Keller, TU München, 2002, entnommen

# Schadensmechanismus bei einem Blasen kollaps in Wandnähe

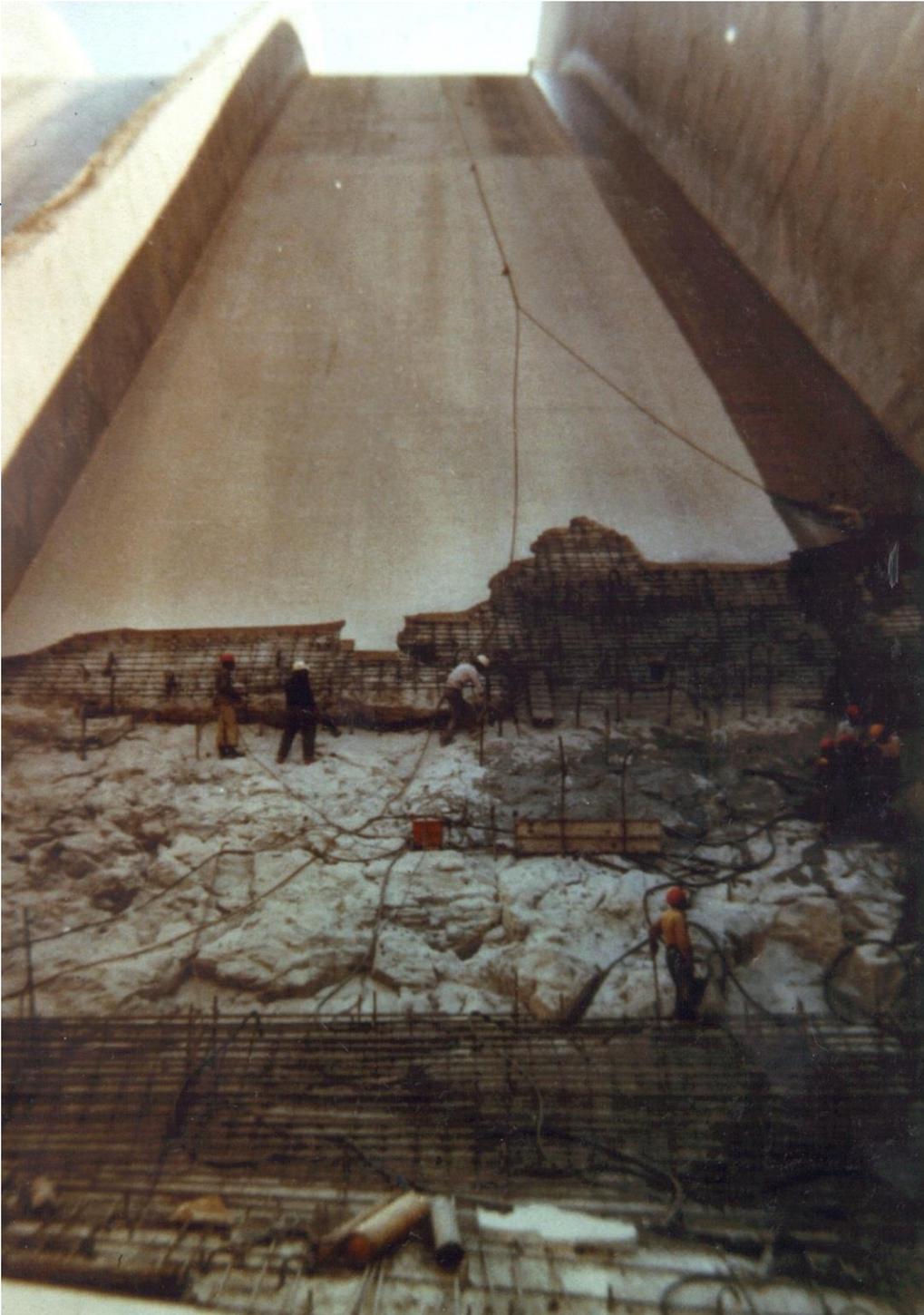


aus einem Weiterbildungsvortrag von Herrn Dr. Keller, TU München, 2002, entnommen



Oberflächenprofil	Vorgang
	Lockerung von Gefüge und Schutzschichten, Ermüdung
	Bildung von „pits“ (= plast. Verformung)
	Überlappung von „pits“
	Bruchvorgänge, Volumen- bzw. Massenverlust

aus einem Weiterbildungsvortrag von Herrn Dr. Keller, TU München, 2002, entnommen



Quelle: Dr. Keller, TU München



Quelle: Dr. Keller, TU München



Quelle: Dr. Keller, TU München

# Reduzierung / Zusammenbrauch der Energieübertragung in einer Strömungsmaschine

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

Tafelbild

- Der Blasen kollaps führt zu einer sehr schnellen Druckänderung im umgebenden Fluid, die sich als Schallwelle im Fluid ausbreitet
- Für die Analyse ist zu beachten, ob sich die Schallwelle ungestört ausbreiten kann oder an Wänden und/oder Phasengrenzen beeinflusst wird.



- Kavitation hat, wie dargestellt, verschiedene Auswirkungen. Diese können zur Definition von Bewertungsgrößen dienen.
- Beispiele:
  - Materialzerstörung – Materialabtrag je Zeiteinheit in  $m^3$  an einem Bauwerk
  - Reduzierung der Energieübertragung – Verringerung der Förderhöhe von Pumpen
  - Schallerzeugung – Schallabstrahlung eines Propellers, z.B. Messung der Verratsreichweite

- Kavitationszahl:  $\sigma = \frac{p_S - p_D}{0,5 \cdot \rho \cdot c_S^2}$  ,  $\sigma \leq 0$  Kavitation
- NPSH (net positive suction head, Haltedruckhöhe):

$$NPSH_{erf} = \frac{p_S - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{c_S^2}{2g} + Z_S$$

$$NPSH_{vorh} = \frac{p_e - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{c_S^2}{2g} + Z_e - H_{v,s}$$

- $NPSH_{\text{vorh}}$  ist die Haltedruckhöhe, die eine Anlage zur Verfügung stellt.
- $NPSH_{\text{erf}}$  ist die Haltedruckhöhe, die eine Pumpe benötigt, um eine zu definierende Grenze nicht zu unterschreiten.
- Beispiele für übliche Grenzen sind: 3% Abfall der Förderhöhe oder 3% Abfall des Wirkungsgrades
- z.B.  $NPSH_{\text{erf,H3\%}}$  ... 3% Abfall der Förderhöhe
- Für einen dauerhaft sicheren Pumpenbetrieb muss

$$\mathbf{NPSH_{\text{vorh}} > NPSH_{\text{erf}}}$$

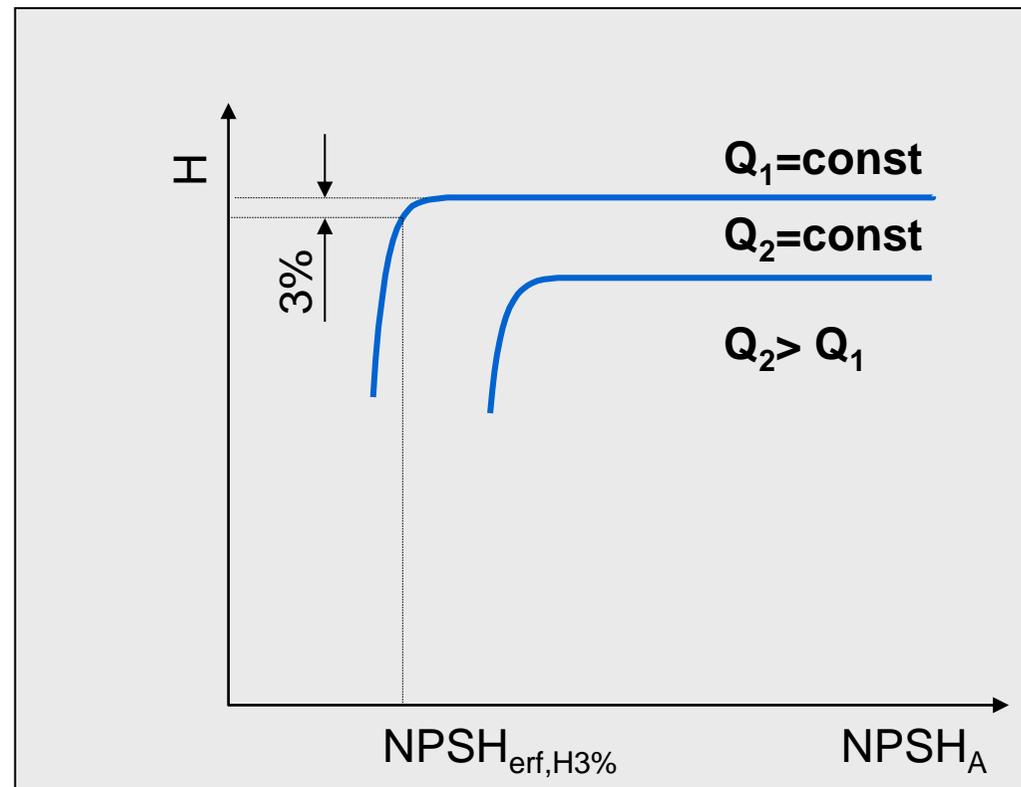
sein.

- $NPSH_i$  ist die Haltedruckhöhe, bei der Kavitationsvorgänge sichtbar einsetzen.
- $NPSH_{vk}$  ist die Haltedruckhöhe, bei der die sogenannte Vollkavitation vorhanden ist. Im Laufrad ist weitgehend eine Zweiphasenströmung vorhanden.
- andere Definitionen des NPSH-Wertes können sich beziehen auf

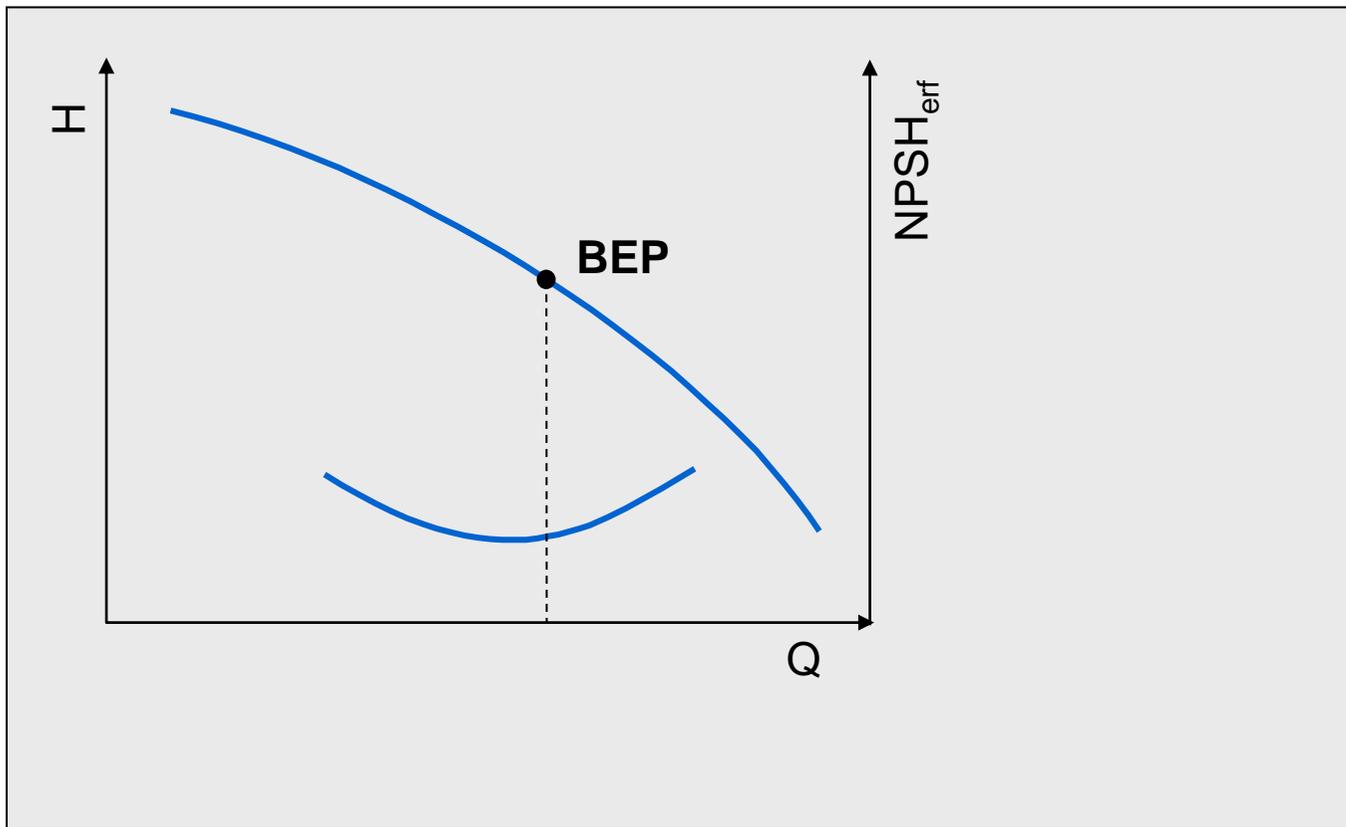
Materialabtrag  
Geräuschemission  
Lebensdauer

- Installation der Pumpe in einem Prüfstand, in dem der NPSH-Wert der Anlage verändert werden kann.
- Betrieb der Pumpe bei konstanter Drehzahl.
- Einstellung eines konstanten Volumenstromes (und damit einer konstanten Förderhöhe) und Verringerung der Haltedruckhöhe der Anlage bis die Förderhöhe um 3% abfällt.
- Wiederholung dieses Prozesses für andere Volumenströme.
- Auftragung der gemessenen Werte als  $\text{NPSH}_{\text{erf,H3\%}} = f(Q)$ -Kurve.
- Äquivalent kann auch für die Messung anderer Kriterien, wie z.B. Wirkungsgradabfall vorgegangen werden.

# Messung des $NPSH_{\text{erf}}$ -Wertes unter Berücksichtigung der Grenze 3% Förderhöhenabfall



# Typische Kennlinie $NPSH_{\text{erf}} = f(Q)$ einer Kreiselpumpe



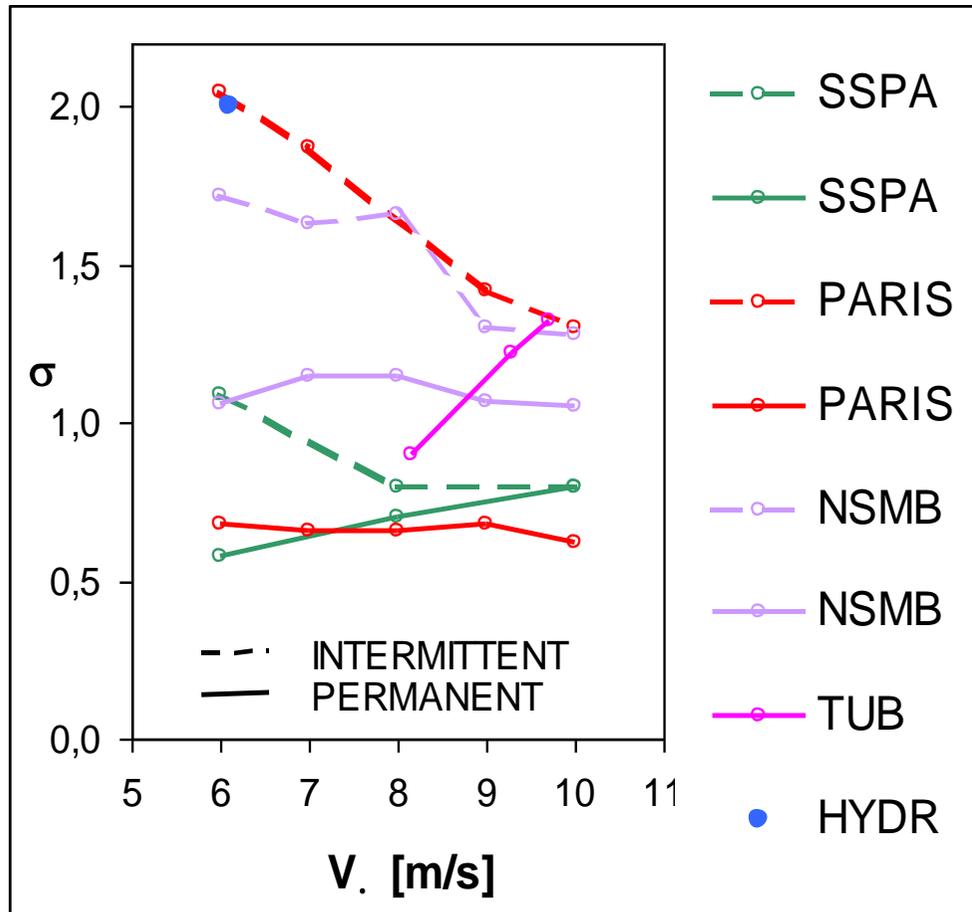
- Das Verständnis der dargestellten Zusammenhänge zur Kavitationsentstehung erlaubt einen grundlegenden Einblick in dessen Mechanismen.
- In realen Strömungen ist die Ausbildung von Kavitation ein sehr komplizierter Vorgang, der von vielen Faktoren abhängt.

Einflussfaktoren sind z.B.:

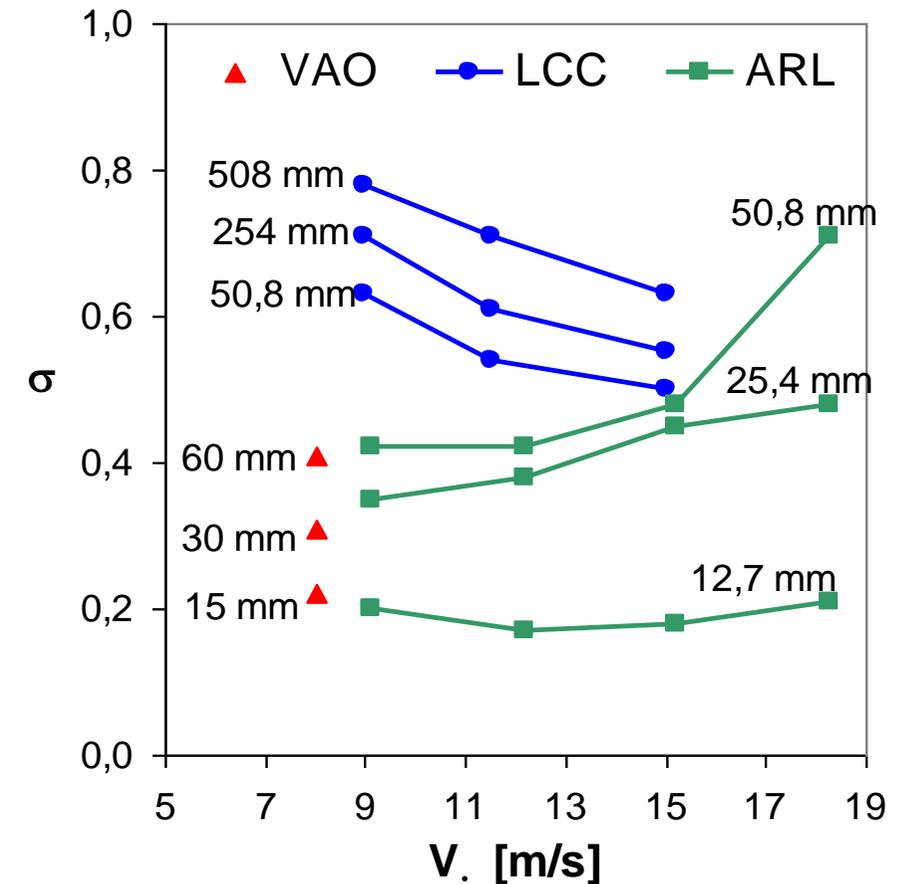
- ▶ Wasserqualität
- ▶ Stoffeigenschaft
- ▶ Strömungsstrukturen
- ▶ Größe und Geometrie des umströmten Körpers

- Die Erfahrung hat gezeigt, dass für das Auftreten von Kavitation Masstabs-  
effekte für verschiedene Größen existieren.
- Dieses Phänomen wurde sehr ausführlich von Herrn Dr. Keller an der TU  
München untersucht. Im Ergebnis hat Dr. Keller empirische Zusammen-  
hänge für Massstabseffekte erarbeitet.

# Kavitationszahl, Messergebnisse verschiedener Einrichtungen für dasselbe Bauteil



TIP VORTEX CAV. INCEPTION



SCHIEBE BODY, CAV. INCEPTION

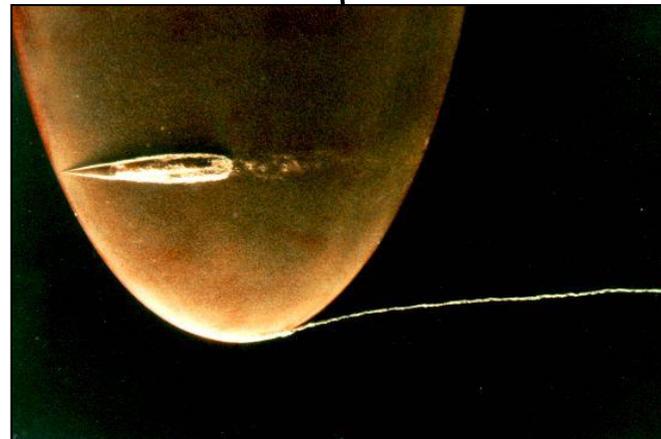
Quelle: Dr. Keller, TU München

Quelle: Dr. Keller, TU München

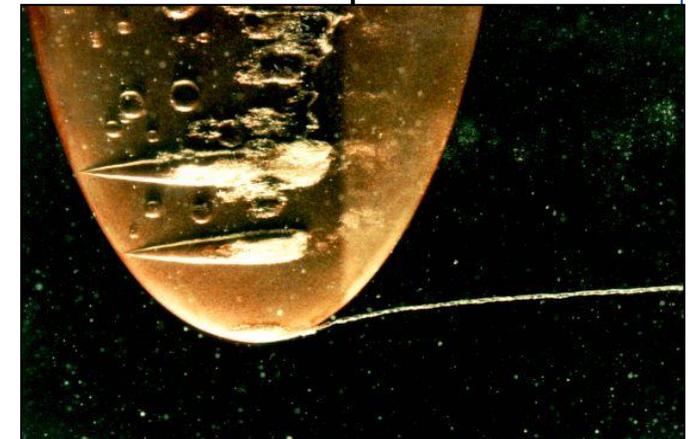
$$\sigma = 0.69$$



high  
tensile strength



zero  
tensile strength

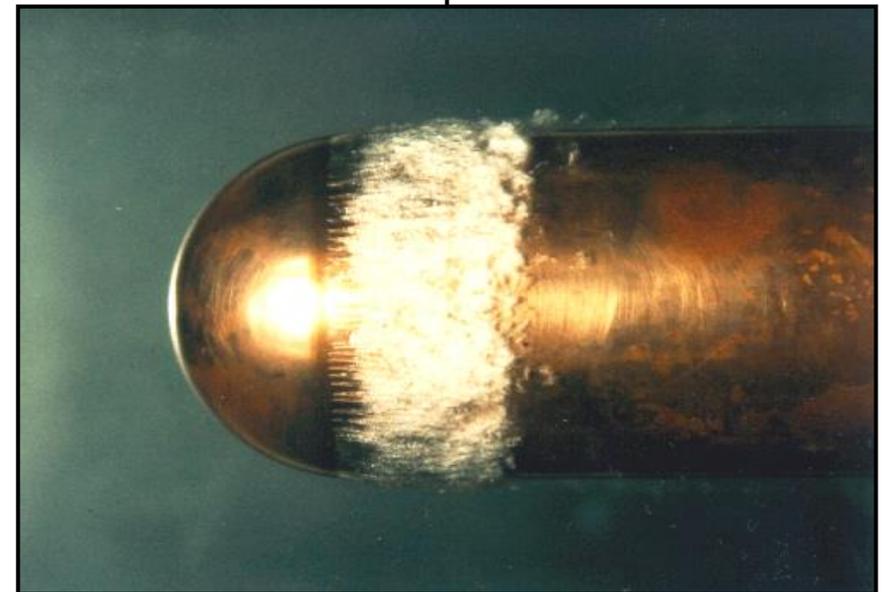


„negative“  
tensile strength

$$\sigma = 0.80$$

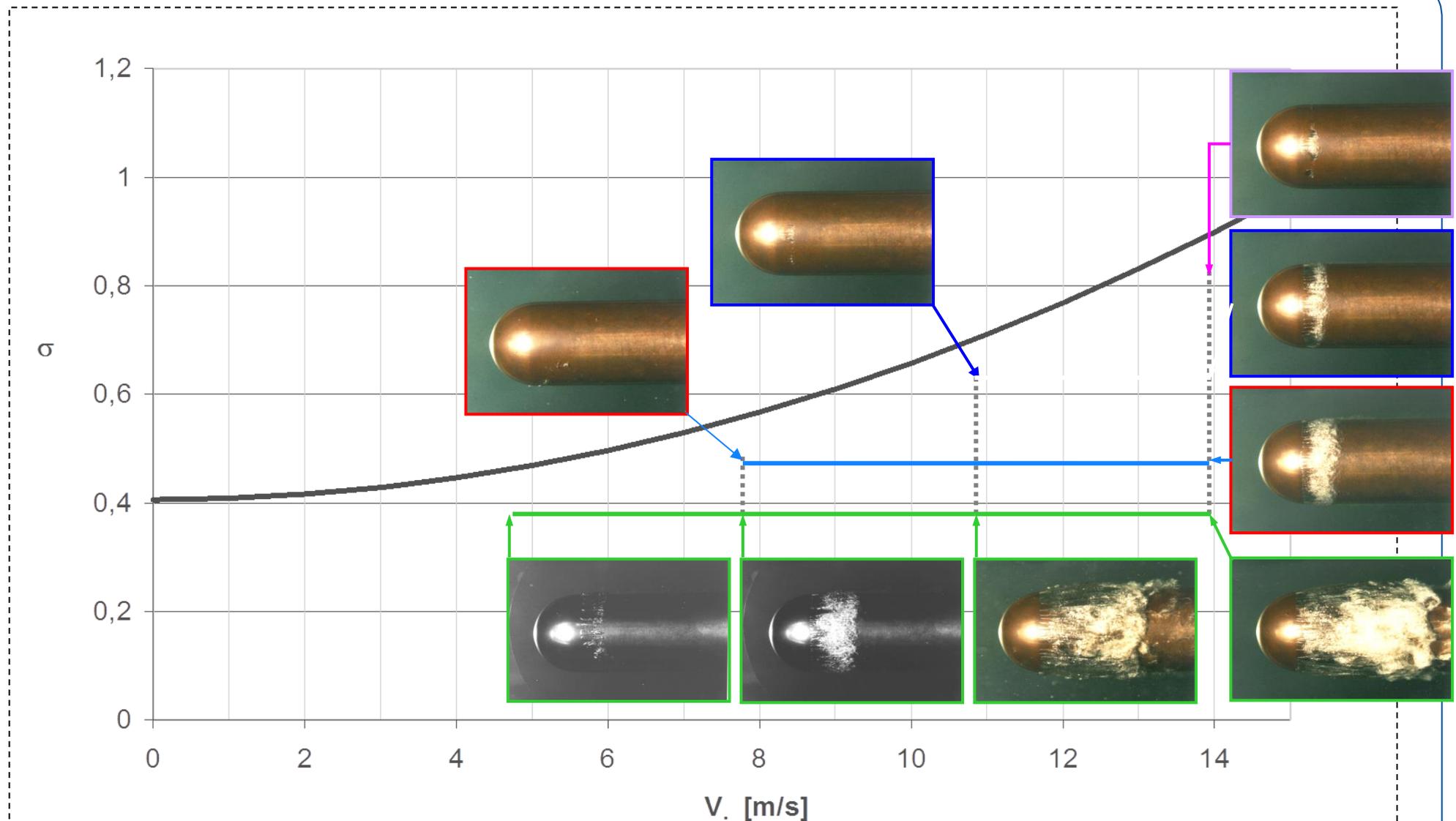


$$V_\infty = 8.0 \text{ m/s}$$



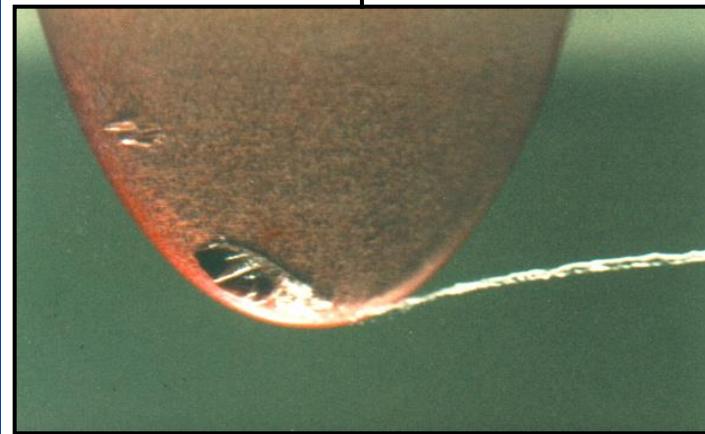
$$V_\infty = 14.0 \text{ m/s}$$

Quelle: Dr. Keller, TU München

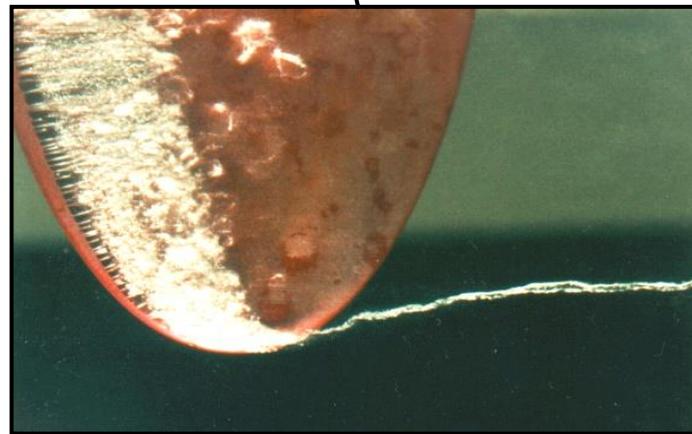


Quelle: Dr. Keller, TU München

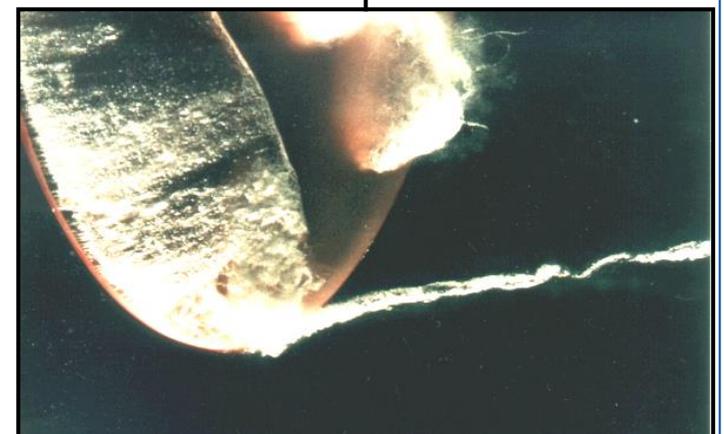
$$\sigma = 2.18, V_{\infty} = 11.0 \text{ m/s}$$



max. chord length  
50 mm

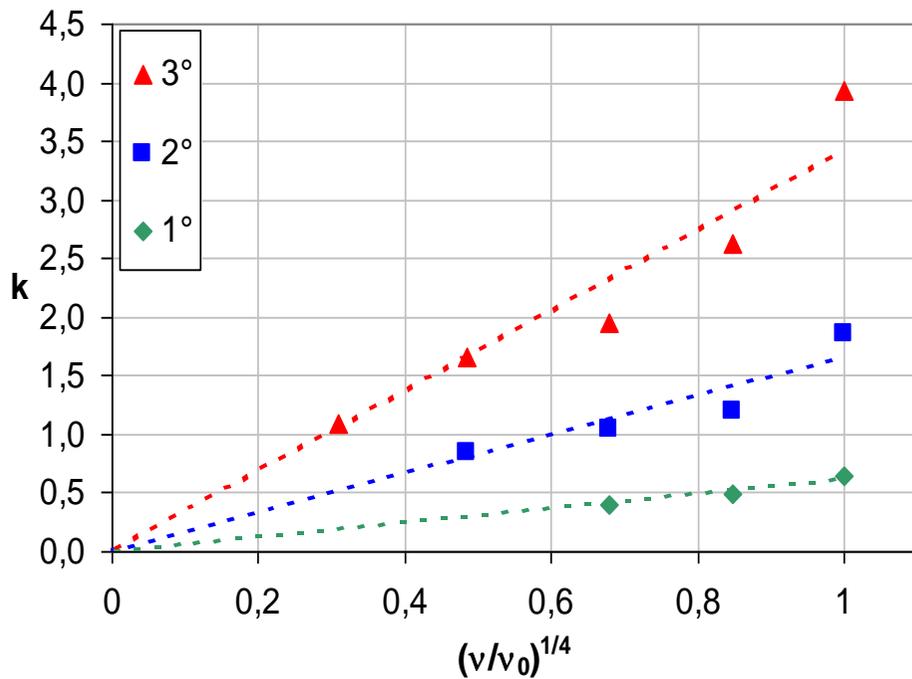


max. chord length  
100 mm

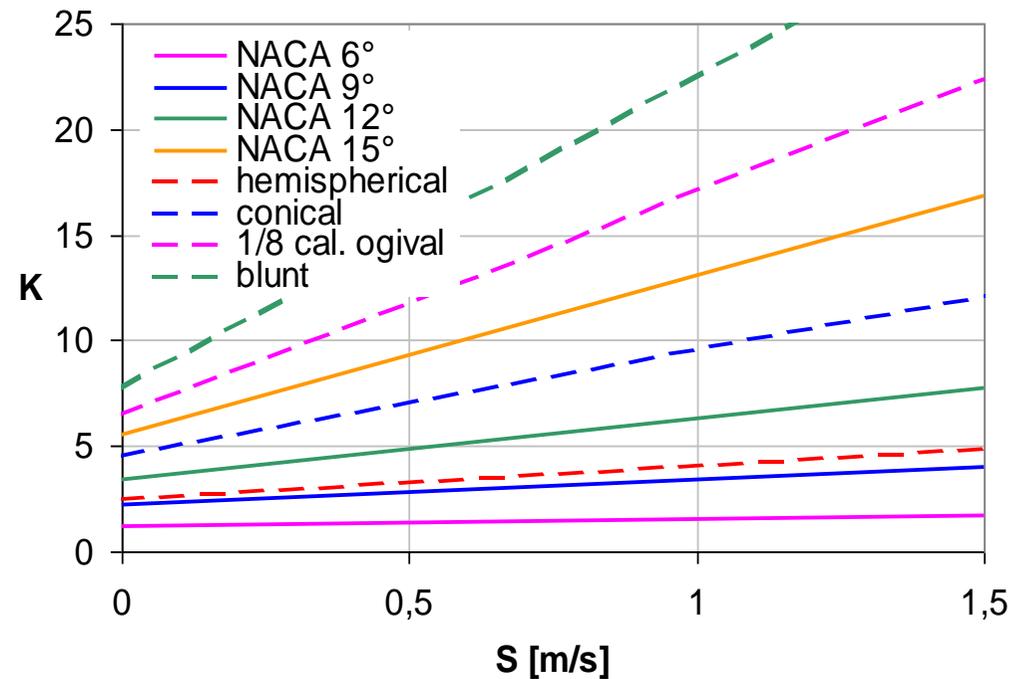


max. chord length  
200 mm

## Viskosität



## Turbulenz



$$k = K \left( \frac{v_0}{v} \right)^{1/4}$$

Quelle: Dr. Keller, TU München

$$K = K_0 \left( 1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

$$\sigma_i = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_0 = k \left( \frac{L}{L_0} \right)^n$$

$$k = K \left( \frac{v_0}{v} \right)^{1/4}$$

$$K = K_0 \left( 1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

$0,35 < n < 0,5$

$$\sigma_i = K_0 \left( \frac{L}{L_0} \right)^n \left( \frac{v_0}{v} \right)^{1/4} \left[ 1 + \left( \frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \left( 1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

Quelle: Dr. Keller, TU München



## Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation

### 1) Anlage

- Erhöhung des  $NPSH_{\text{vorh}}$ , z.B.
  - Zulaufhöhe vergrößern
  - Druck vor der Pumpe vergrößern (z.B. Vorpumpe)
  - Widerstand in der Saugleitung verringern (Nennweite, Einbauten)
- Wasserqualität
- gezieltes Einbringen von Luft in die Saugleitung kurz vor der Pumpe dämpft Schall (hat aber auch Nachteile)
- etc.



## Möglichkeiten des Entwicklungsingenieurs

Verwendung von:

- einem Inducer (Vorsatzläufer)
- einem doppelflutigem Laufrad
- einer Profilierung mit kleinen Unterdruckspitzen
- einer geringeren Drehzahl