



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:

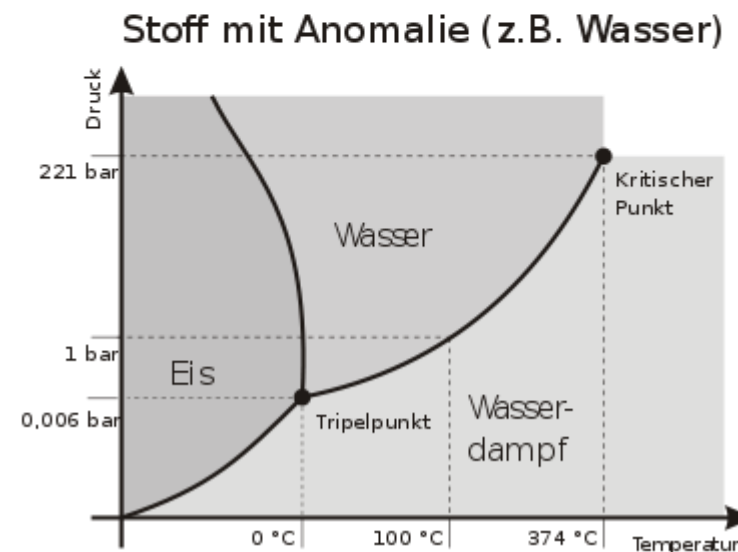
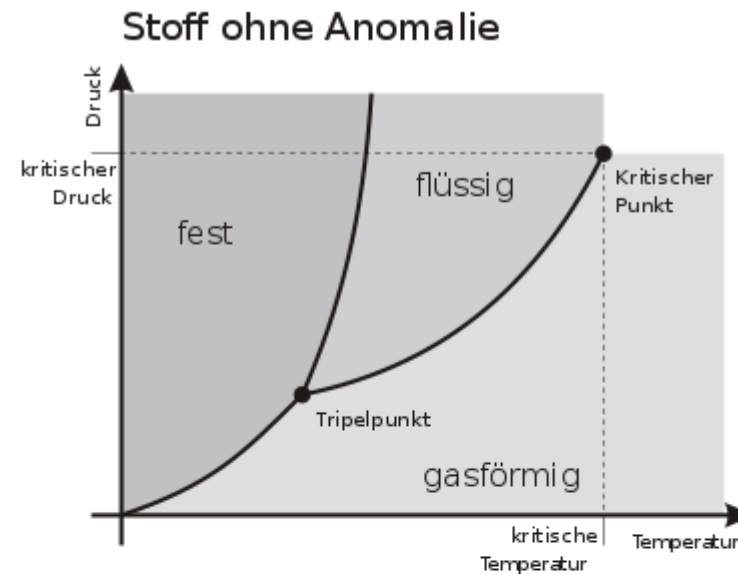
1) Energieerhaltungssatz in der Form

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

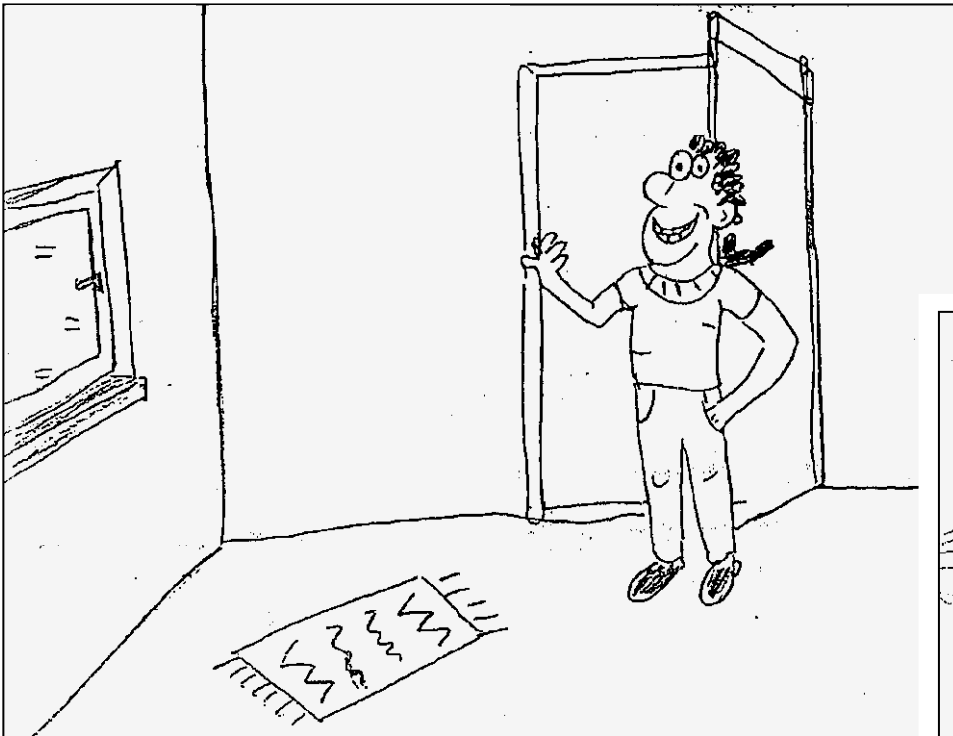
(Beziehung zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit)

2) Abhängigkeit des Sättigungsdruckes (Dampfdruckes) von der Sättigungstemperatur

Aggregatzustand abhängig von Druck und Temperatur

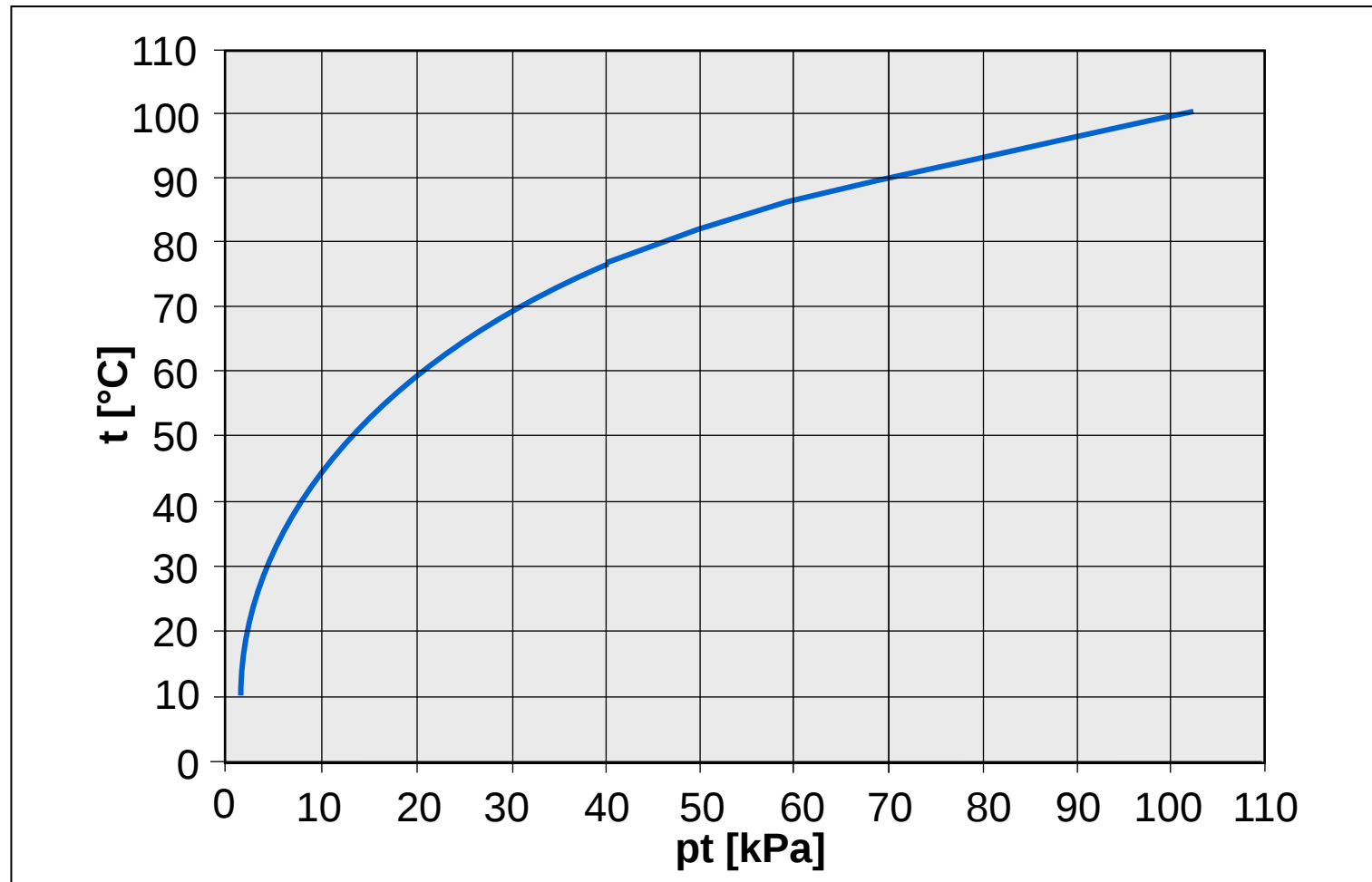


aus WIKIPEDIA





Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur



Tafelbild 2

- ▶ beginnende Kavitation (incipient cavitation)
 - ▶ Blaskenkavitation
 - ▶ Schichtkavitation (sheet cavitation, fixed cavitation)
 - ▶ Wolkenkavitation (cloud cavitation)
 - ▶ Superkavitation / Vollkavitation
-
- ▶ Strahlkavitation
 - ▶ Schaufelspitzenwirbel-Kavitation

Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbilder 3 und 4.
Video cloud cavitation



Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbilder 5, 6 und 7.

Kollaps von Blasen und Wolken



Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbild 8 und 9.
Vortrag Kinko

Kollaps von Blasen und Wolken



Phänomenologische Erklärung siehe Tafelbild 8 und 9.
Vortrag Kinko

80

CAVITATION BUBBLE COLLAPSE

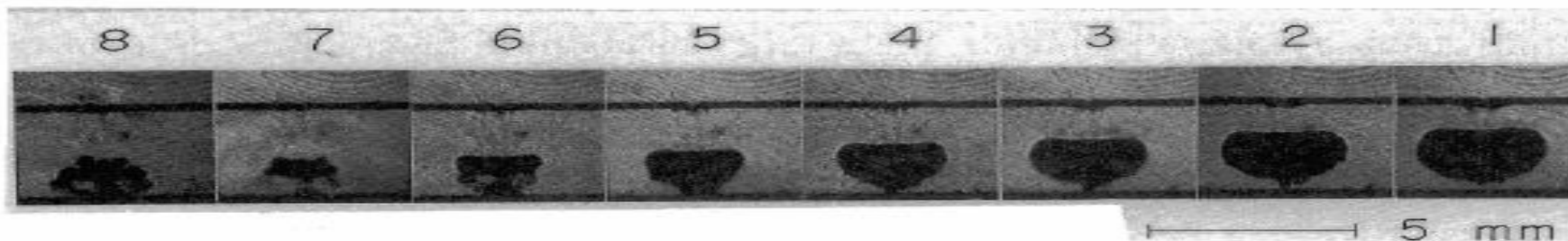
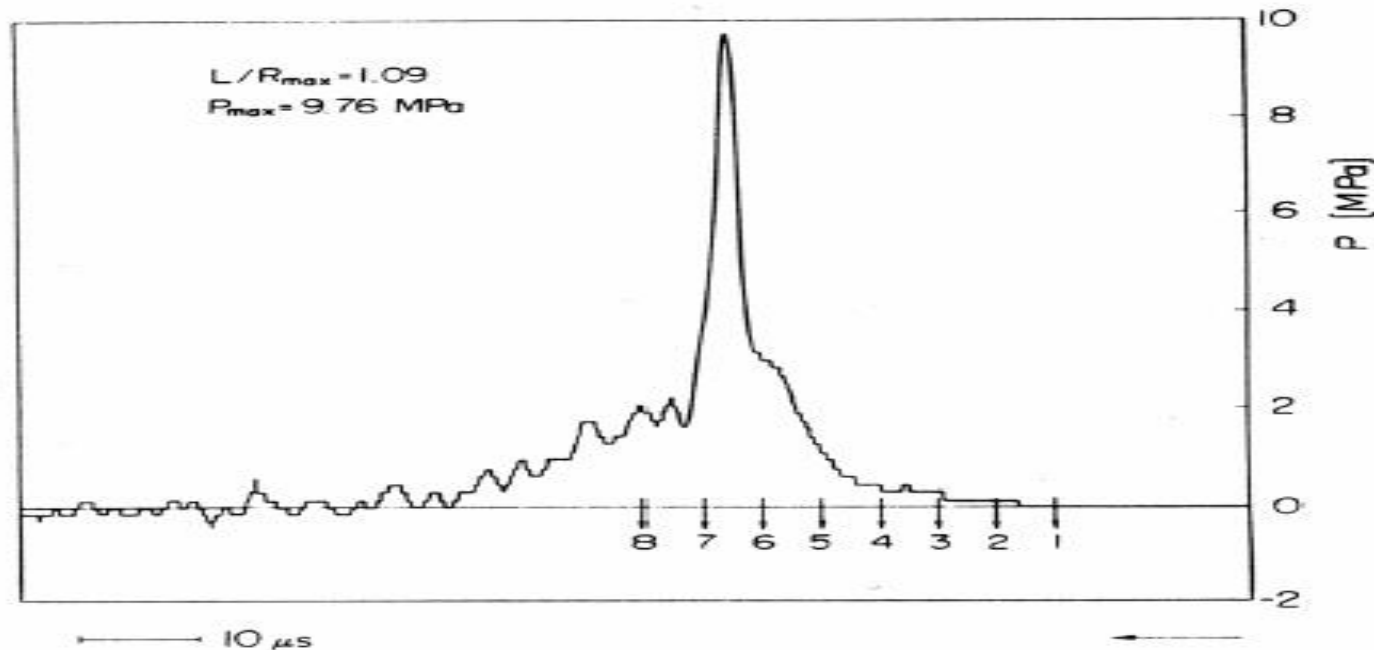


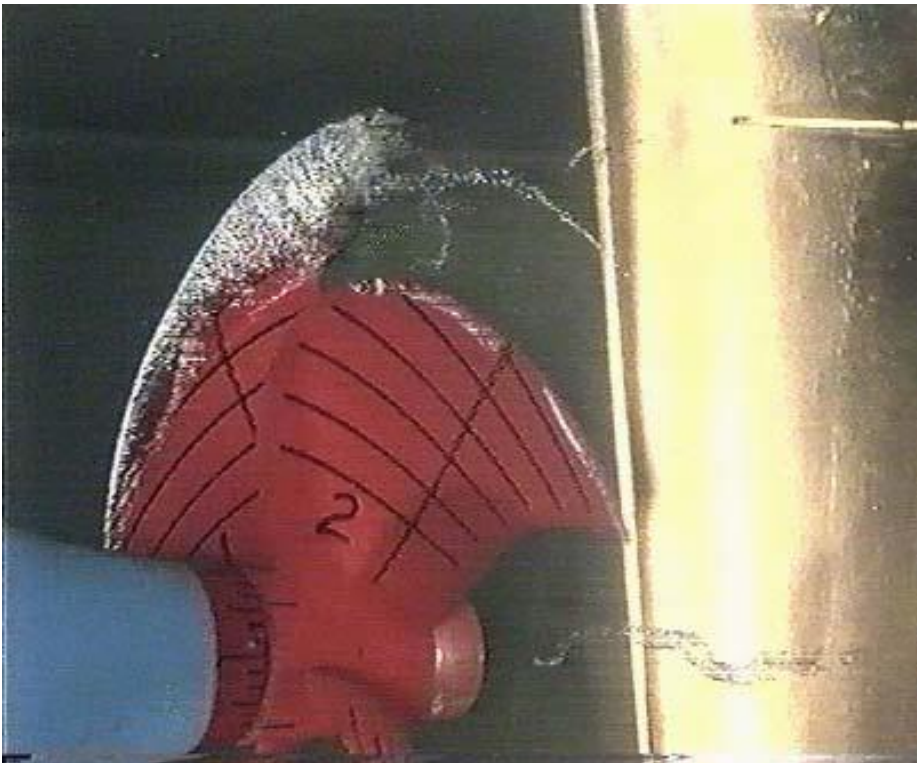
Fig. 3.12. Series of photographs of a cavitation bubble collapsing near a wall along with the characteristic wall pressure trace. The time corresponding to each photograph is marked by a number on the trace. From Shima, Takayama, Tomita, and Ohsawa (1983) reproduced with permission of the authors.

- Der Blasenkollaps 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.

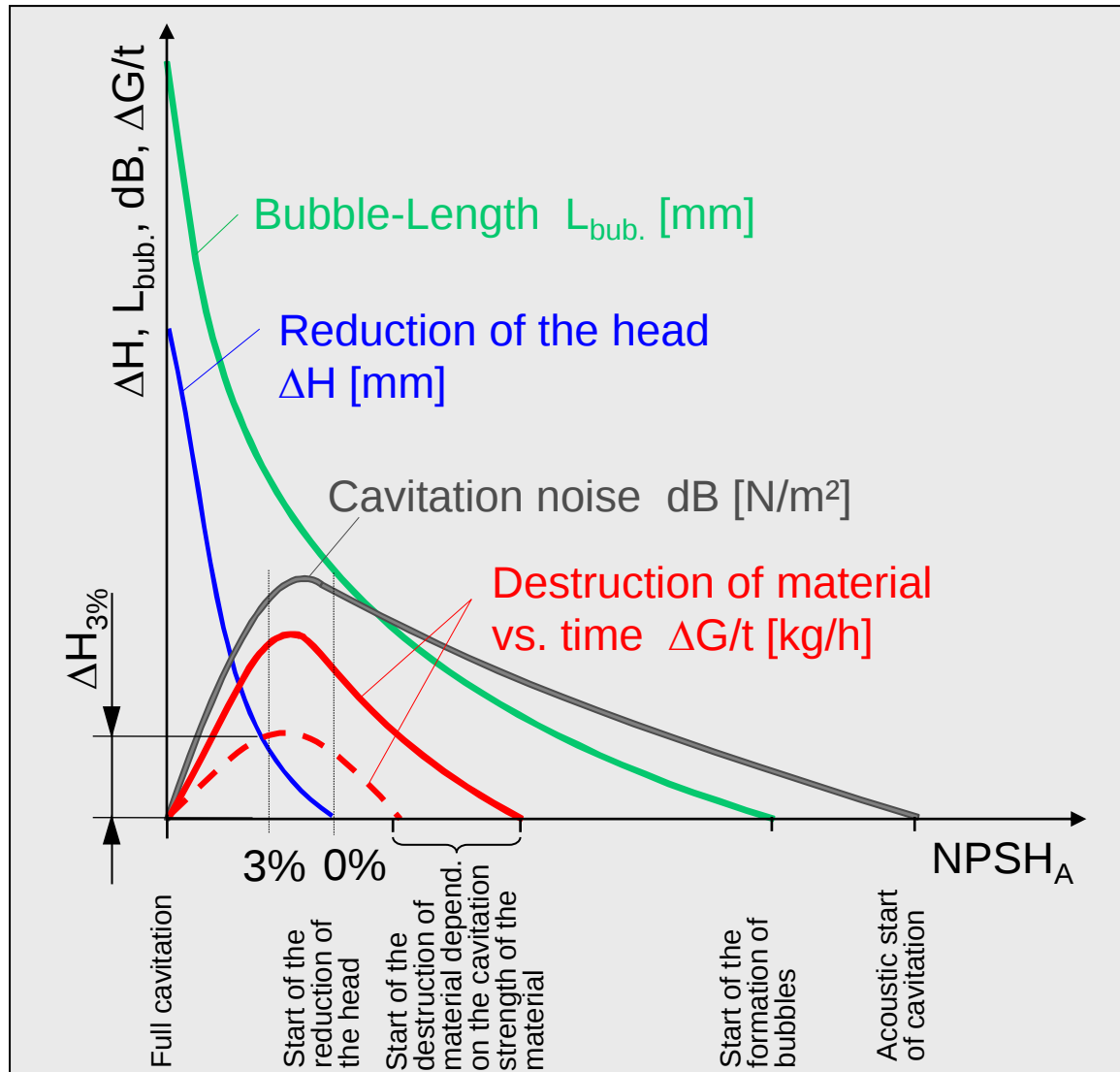
Reduzierung / Zusammenbruch der Funktion einer Strömungsmaschine



Tafelbild 10
Video



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

- 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.:

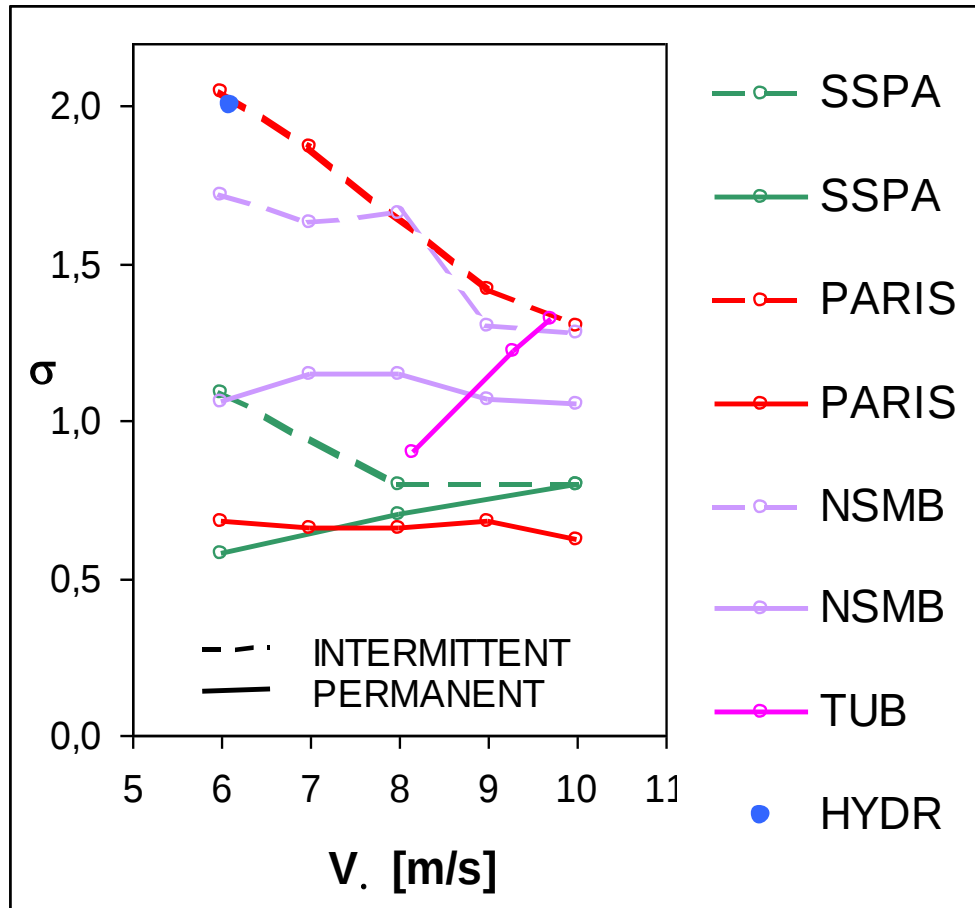
- ▶ Wasserqualität
- ▶ Stoffeigenschaft
- ▶ Strömungsstrukturen
- ▶ Größe und Geometrie des umströmten Körpers

- 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.

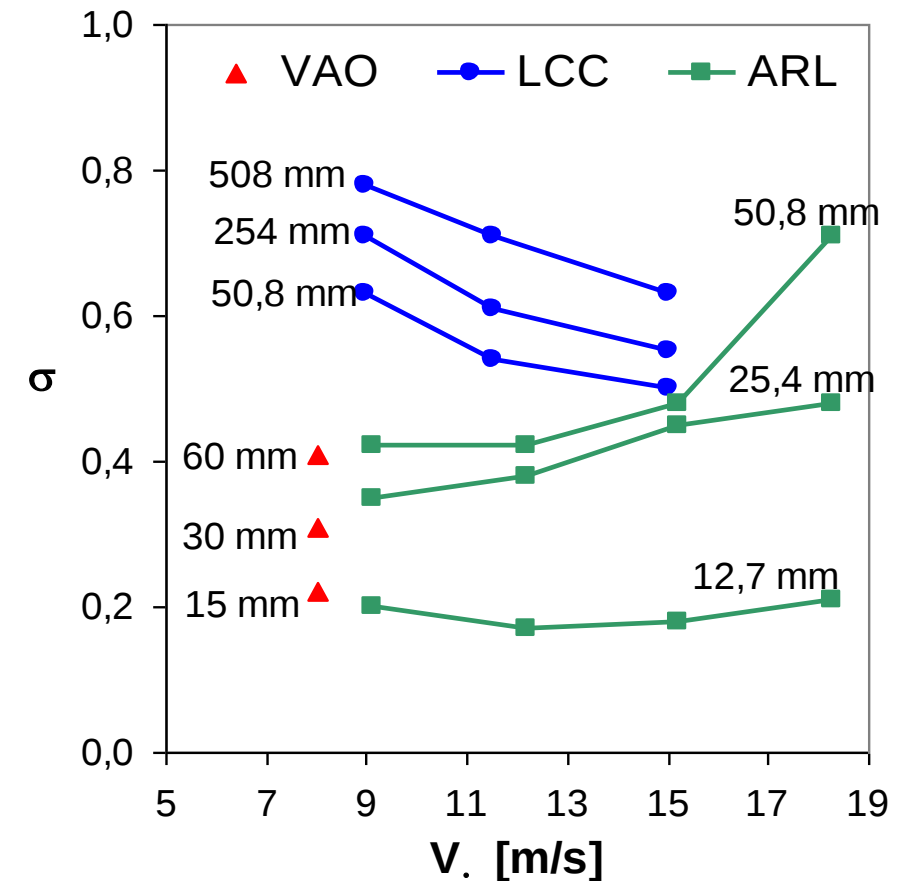
- Kavitationszahl: $\sigma = \frac{p_S - p_D}{0,5 \cdot \rho \cdot c_S^2}$, $\sigma \leq 0$

Kavitation

Kavitationszahl, Messergebnisse verschiedener Einrichtungen für dasselbe Bauteil



TIP VORTEX CAV. INCEPTION

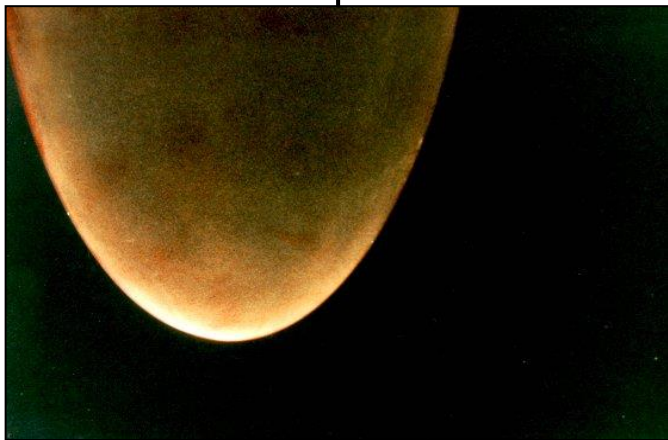


SCHIEBE BODY, CAV. INCEPTION

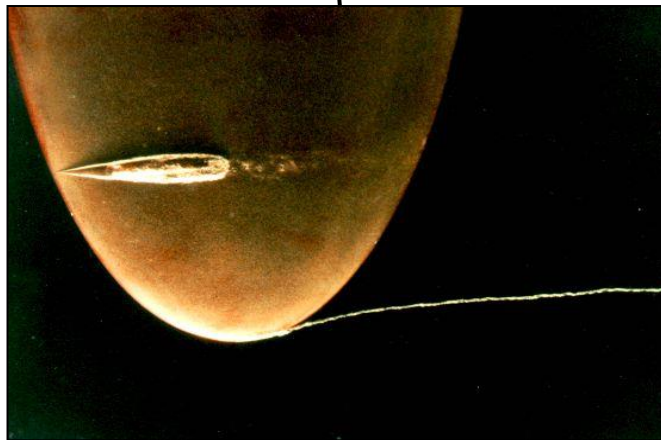
Quelle: Dr. Keller, TU München

Quelle: Dr. Keller, TU München

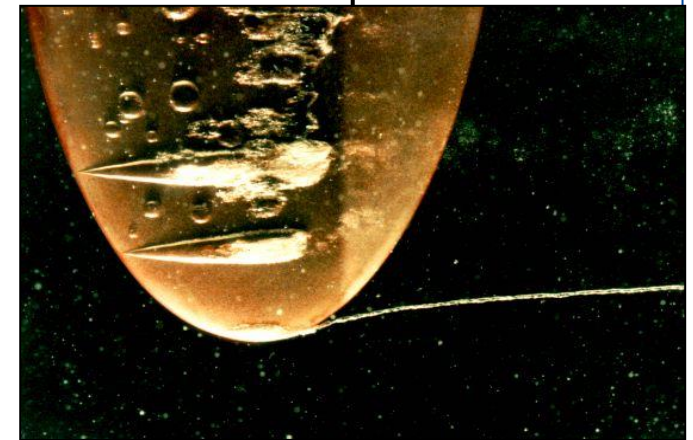
$$\sigma = 0.69$$



high
tensile strength



zero
tensile strength

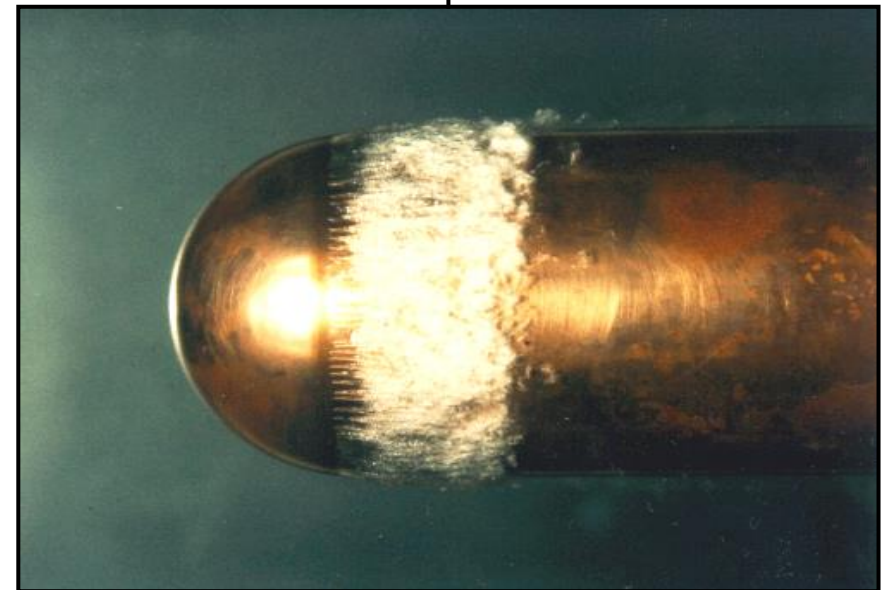


„negative“
tensile strength

$$\sigma = 0.80$$

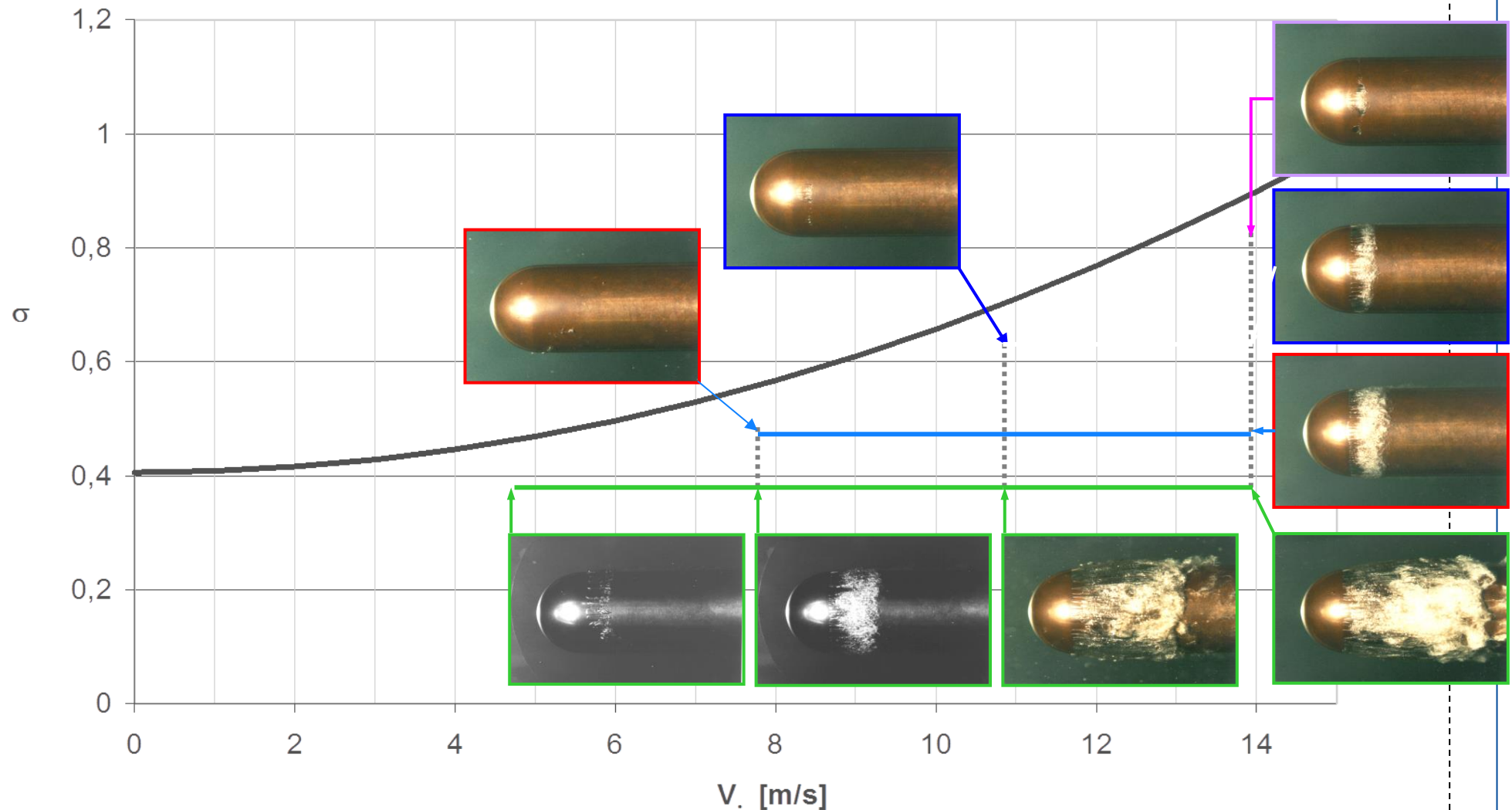


$$V_{\infty} = 8.0 \text{ m/s}$$



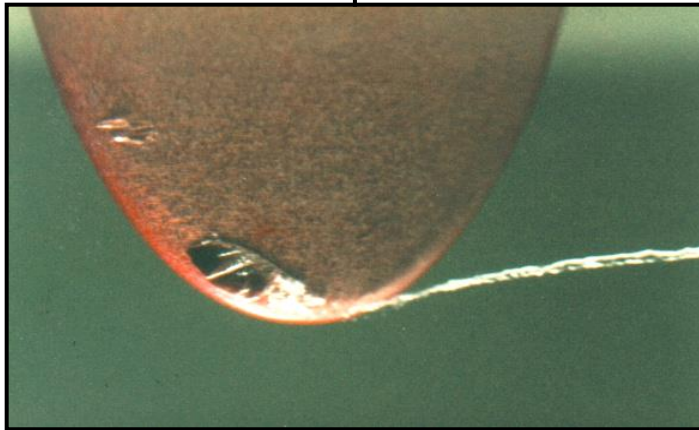
$$V_{\infty} = 14.0 \text{ m/s}$$

Quelle: Dr. Keller, TU München

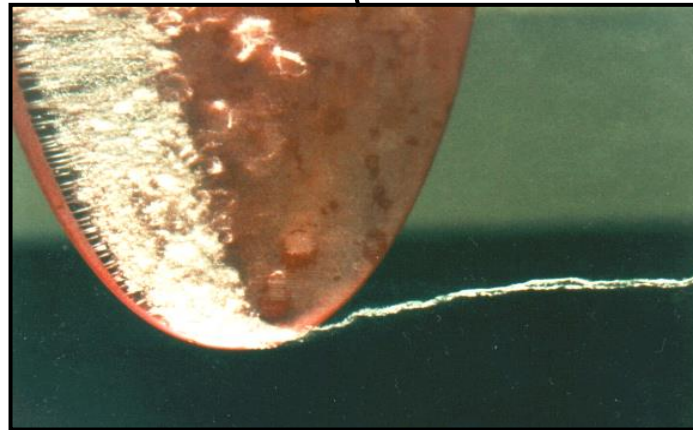


Quelle: Dr. Keller, TU München

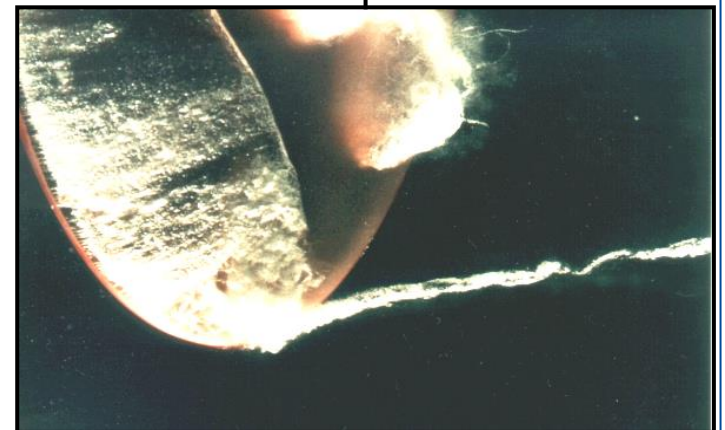
$$\sigma = 2.18, V_{\infty} = 11.0 \text{ m/s}$$



max. chord length
50 mm

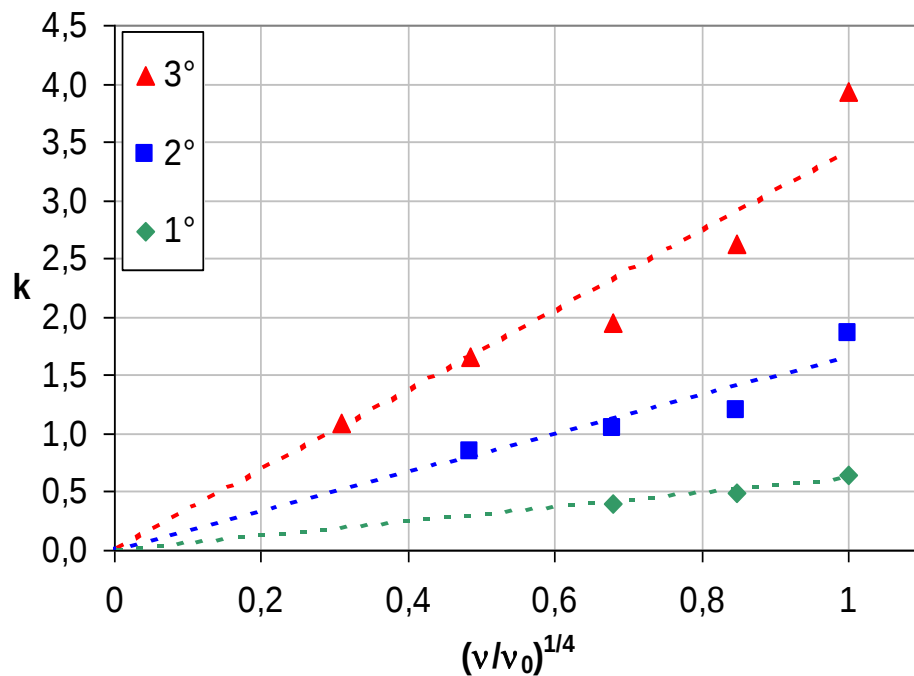


max. chord length
100 mm

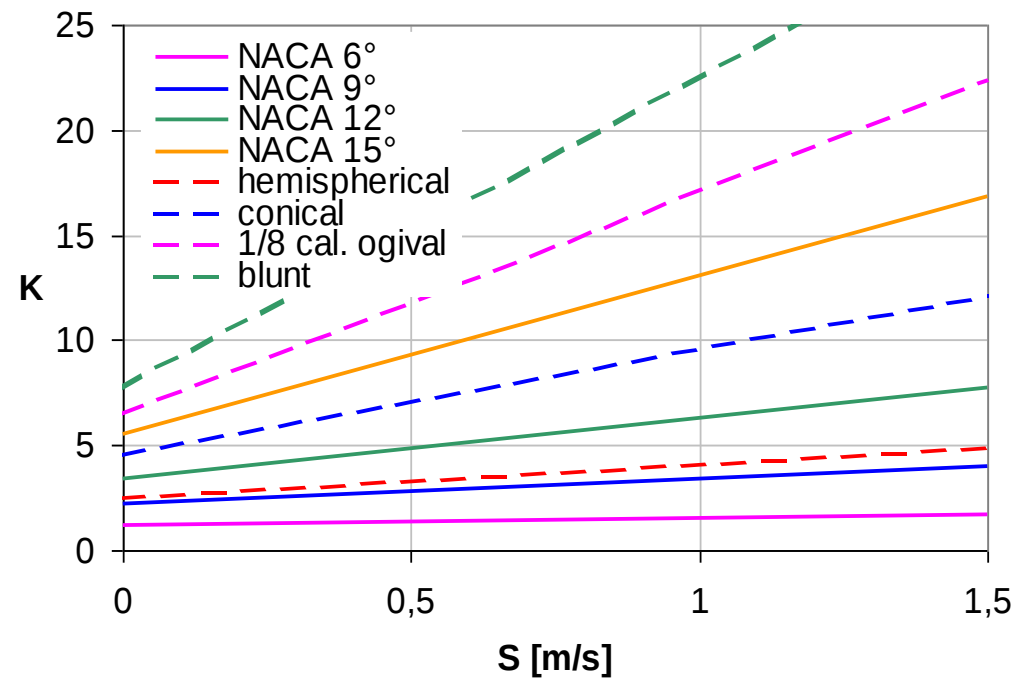


max. chord length
200 mm

Viskosität



Turbulenz



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

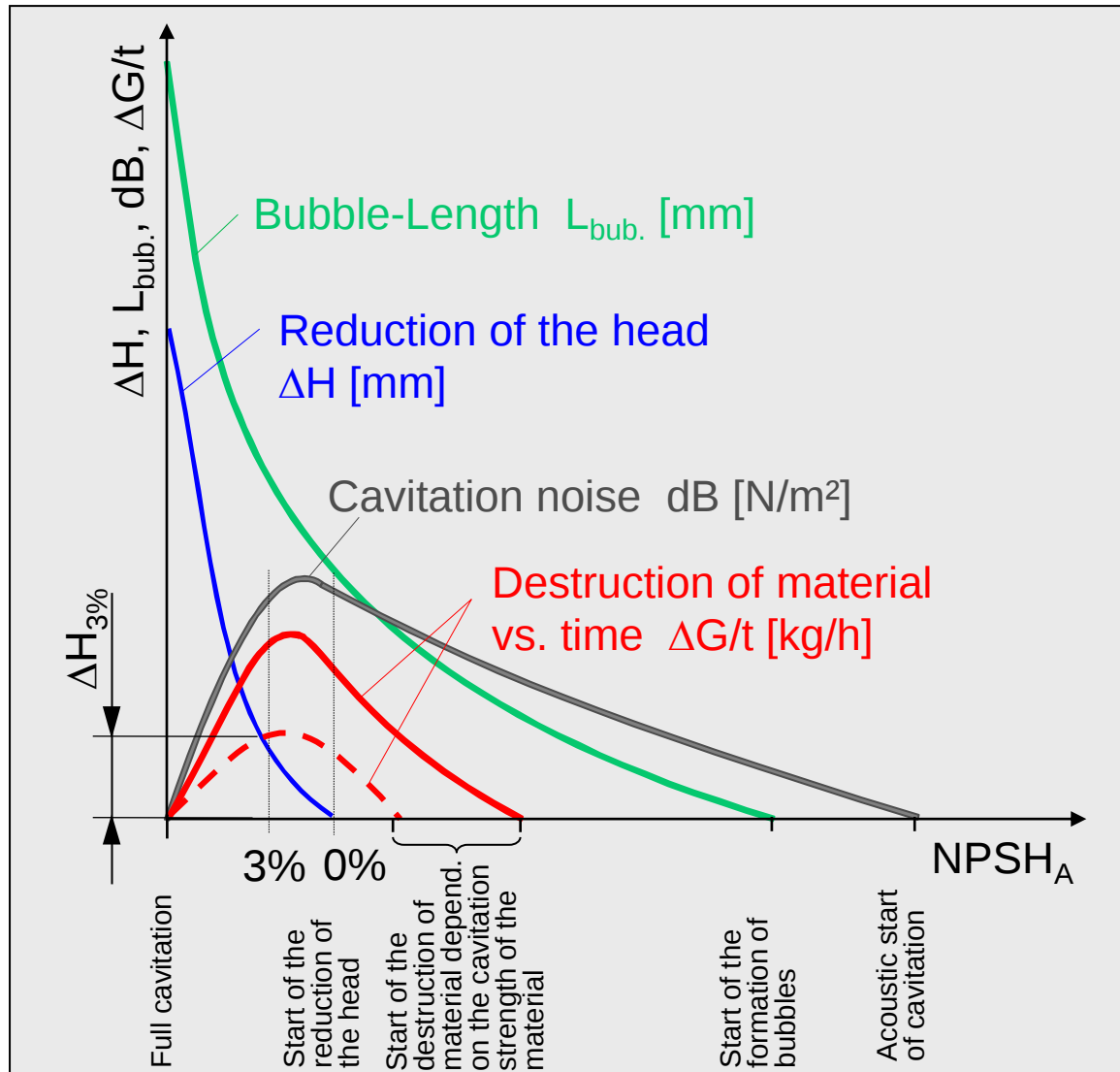
Quelle: Dr. Keller, TU München

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

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \\ \sigma_0 &= k \left(\frac{L}{L_0} \right)^n \\ k &= K \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4} \\ K &= K_0 \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right) \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} 0,35 < n < 0,5 \end{array} \right\} \sigma_i = K_0 \left(\frac{L}{L_0} \right)^n \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4} \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

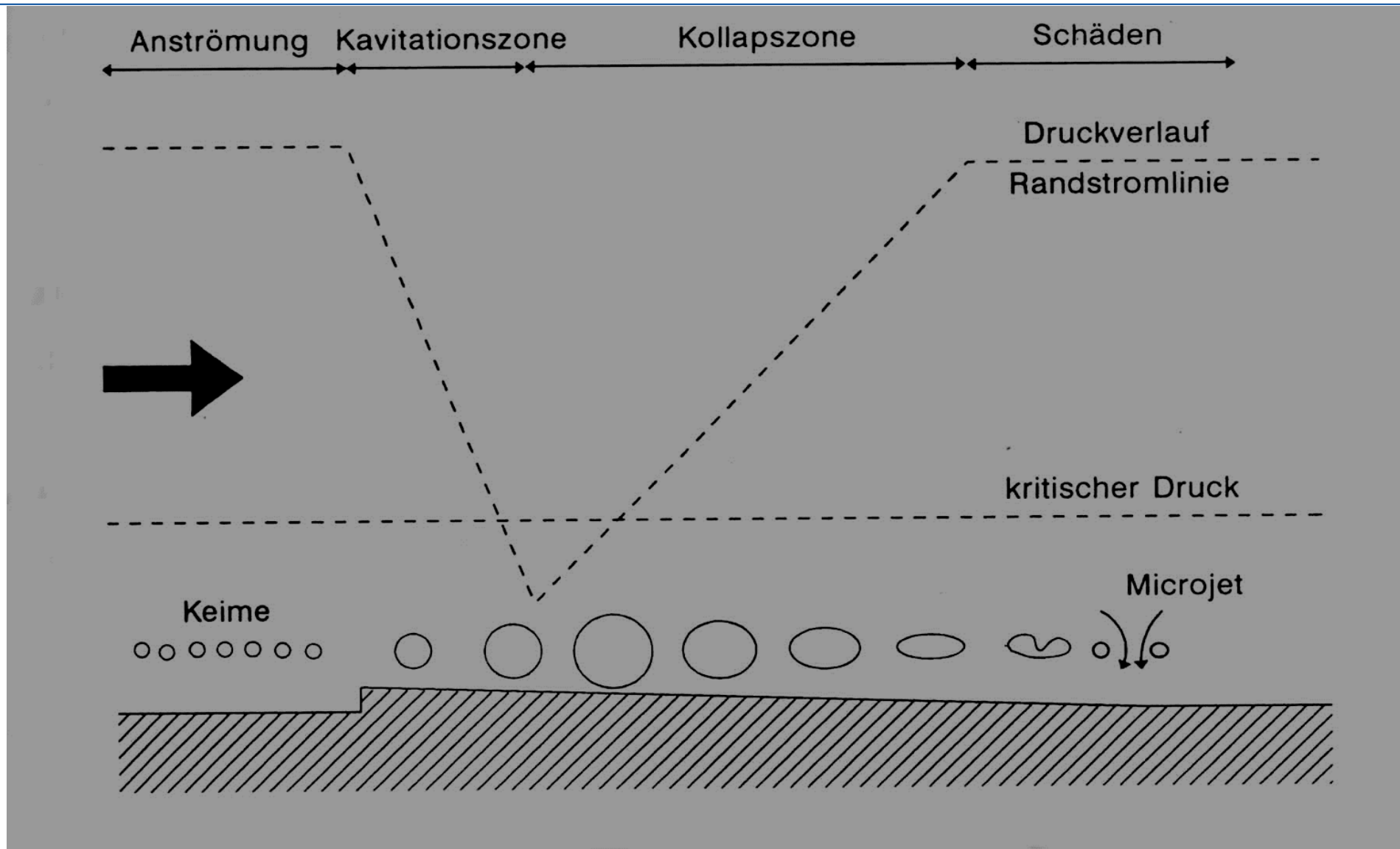
Quelle: Dr. Keller, TU München

Auswirkungen von Kavitation in Strömungsmaschinen



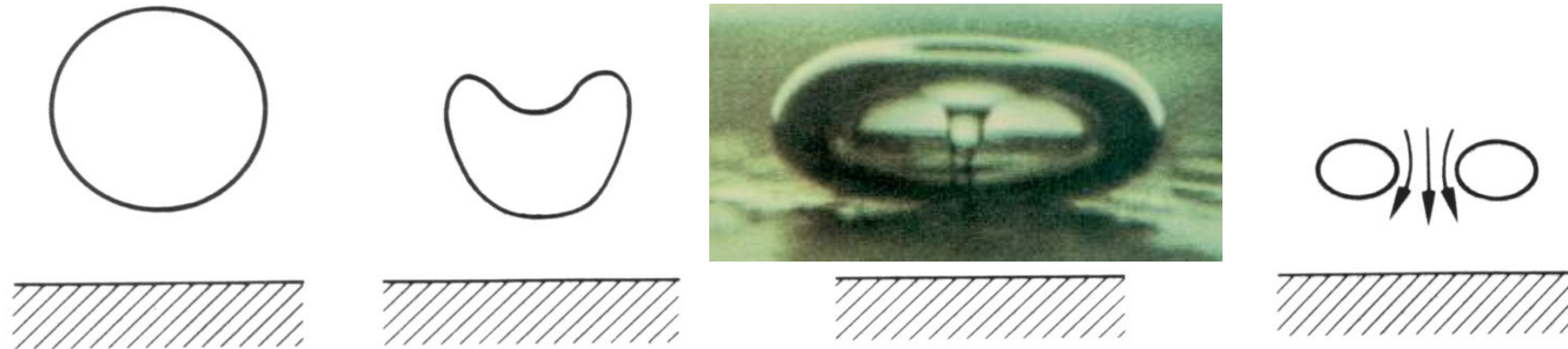
Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von $NPSH_A$ bei konstanter Drehzahl und konstantem Förderstrom (nach Florjanic, D.; Gülich, J. und Wesche.: „Beurteilungskriterien für die Wahl des Zulaufdruckes von Kreiselpumpen“. 3R International, 27 [1988], Heft 7, S. 502/509)

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

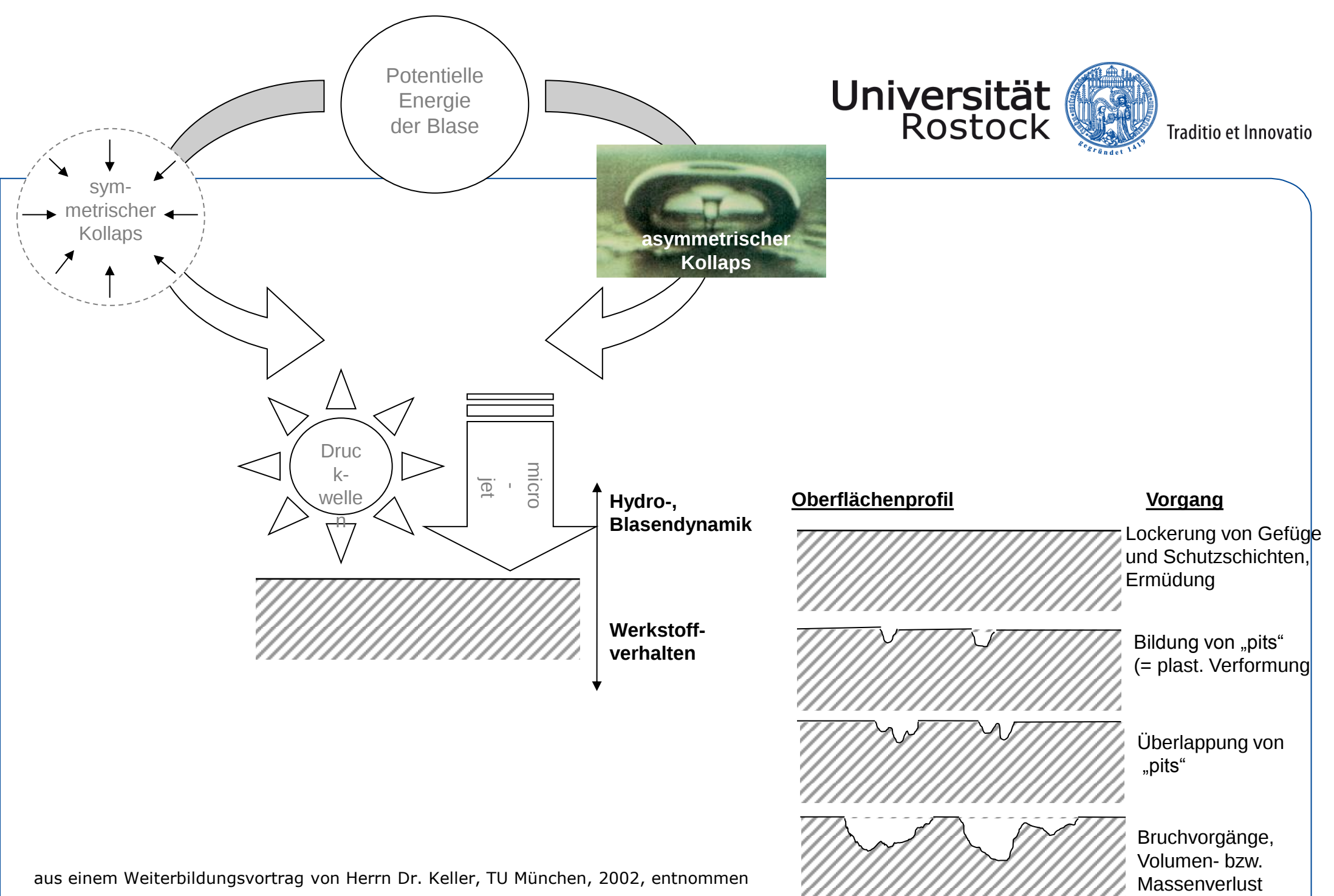


aus einem Weiterbildungsvortrag von Herrn Dr. Keller, TU München, 2002, entnommen

Schadensmechanismus bei einem Blasenkolaps in Wandnähe



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



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

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)



Quelle: Dr. Keller, TU München



Quelle: Dr. Keller, TU München



Quelle: Dr. Keller, TU München

- 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

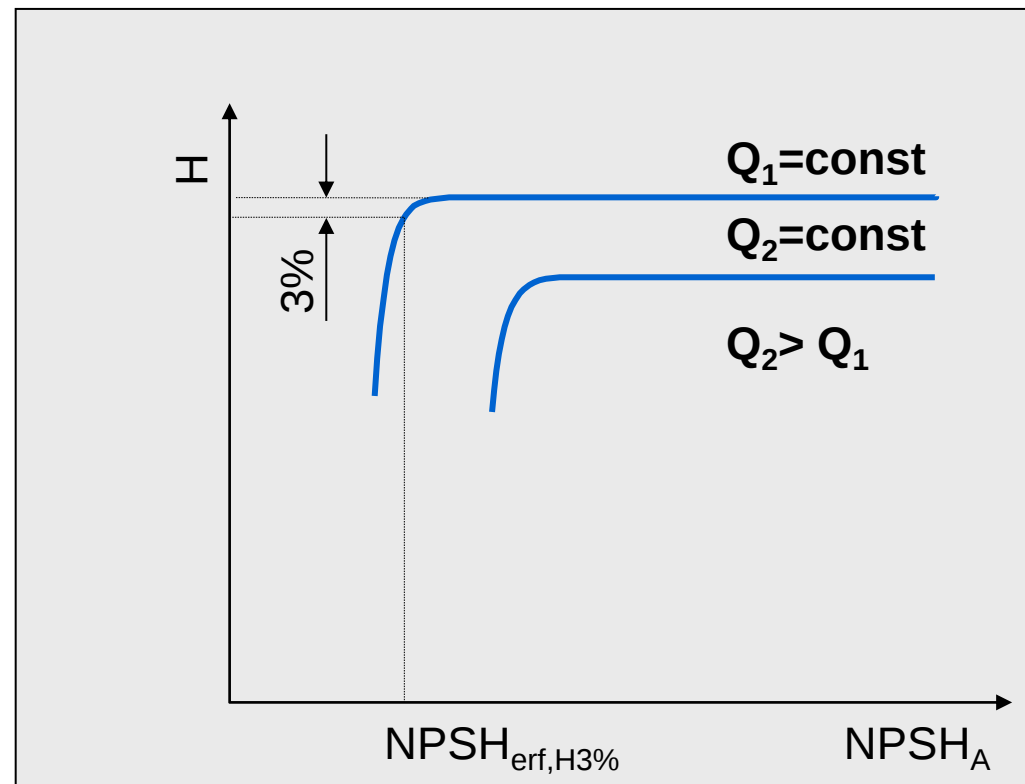
$$\mathbf{NPSH_{\text{vorh}} > NPSH_{\text{erf}}}$$

sein.

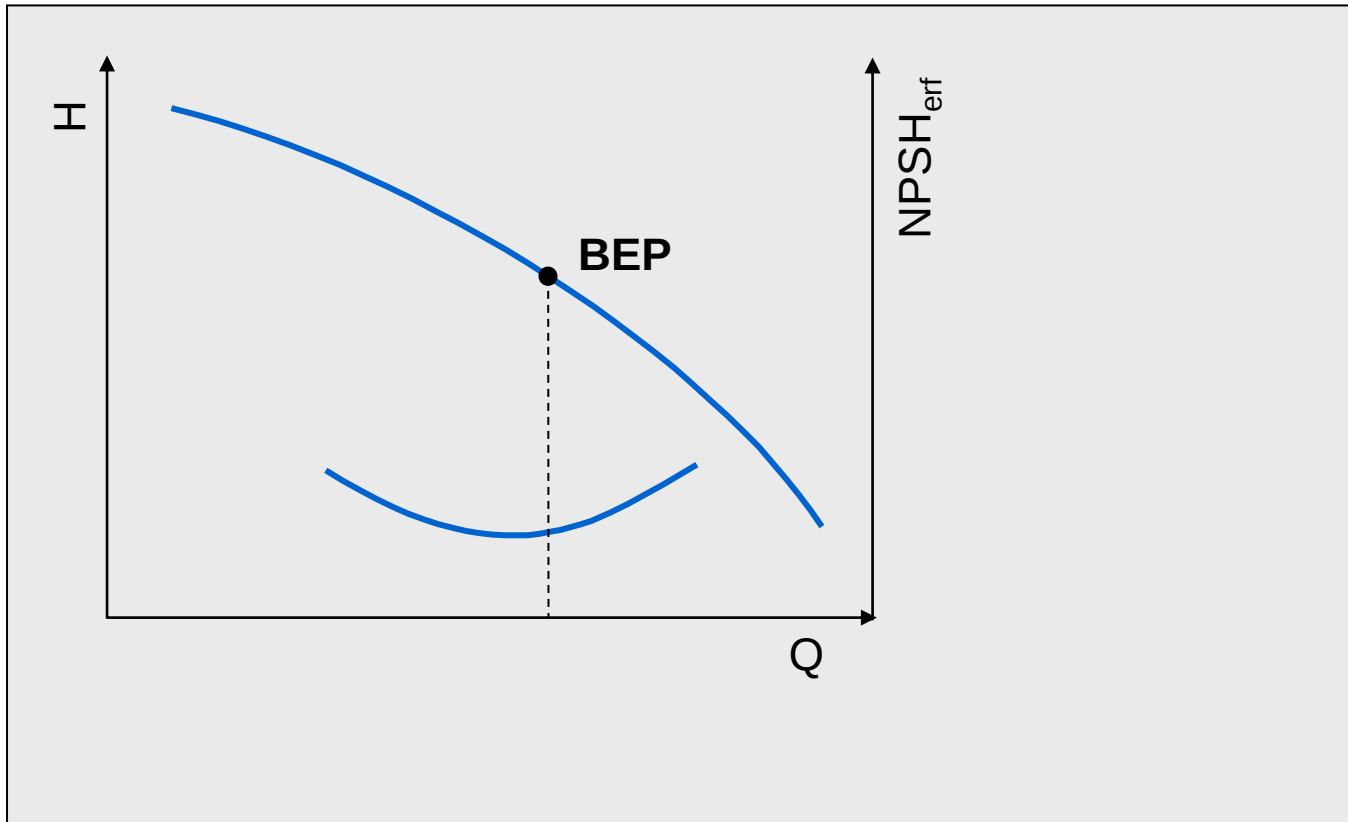
- $NPSH_i$ ist die Haltedruckhöhe, bei der Kavitationsvorgänge sichtbar einsetzen.
- $NPSH_{vk}$ ist die Haltedruckhöhe, bei der die sogenannte Vollkavitation vorhanden ist. Im Laufrad ist weitgehend eine Zweiphasenströmung vorhanden.
- andere Definitionen des NPSH-Wertes können sich beziehen auf
 - 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_{erf} -Wertes unter Berücksichtigung der Grenze 3% Förderhöhenabfall



Typische Kennlinie $\text{NPSH}_{\text{erf}} = f(Q)$ einer Kreiselpumpe



Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation

1) Anlage

- Erhöhung des $\text{NPSH}_{\text{vorh}}$, 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

Separierte Betrachtung der Phasen

- Lösung der Erhaltungsgleichungen für jede Phase und Lösung lokaler Transportgleichungen an der Phasengrenze zur Beschreibung der Wechselwirkungen
- Problem: sehr hohe/unrealistische Rechenzeiten bei hoher Blasendichte; in absehbarer Zeit nicht möglich bei Wolkenkavitation

Betrachtung des Fluids als homogenes Gemisch

- Lösung der Erhaltungsgleichungen für ein homogenes Gemisch beider Phasen („Wolkenkontinuum“, z.B.

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

ρ ... Gemischdichte ; α ... Gasvolumenanteil