Universität Rostock

Traditio et Innovatio

Wintersemester 2015/2016

Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Inhalt der Vorlesung
Hydraul. Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 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)

Inhalt der Vorlesung
Hydr. Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

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

Beispiele für Kavitation in Maschinen und Anlagen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

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

Universität Rostock Traditio et Innovatio

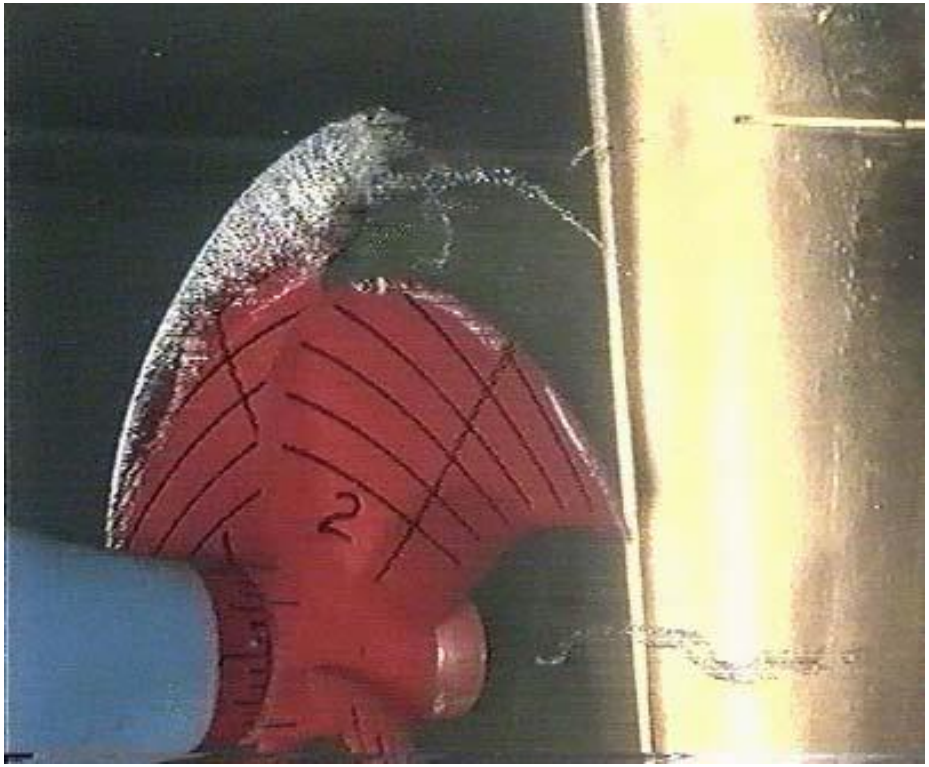
- Schallabstrahlung
- Materialabtrag
- Reduzierung / Zusammenbrauch der Energieübertragung in der Strömungsmaschine

Schallerzeugung durch Kavitation

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 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.

Materialerosion

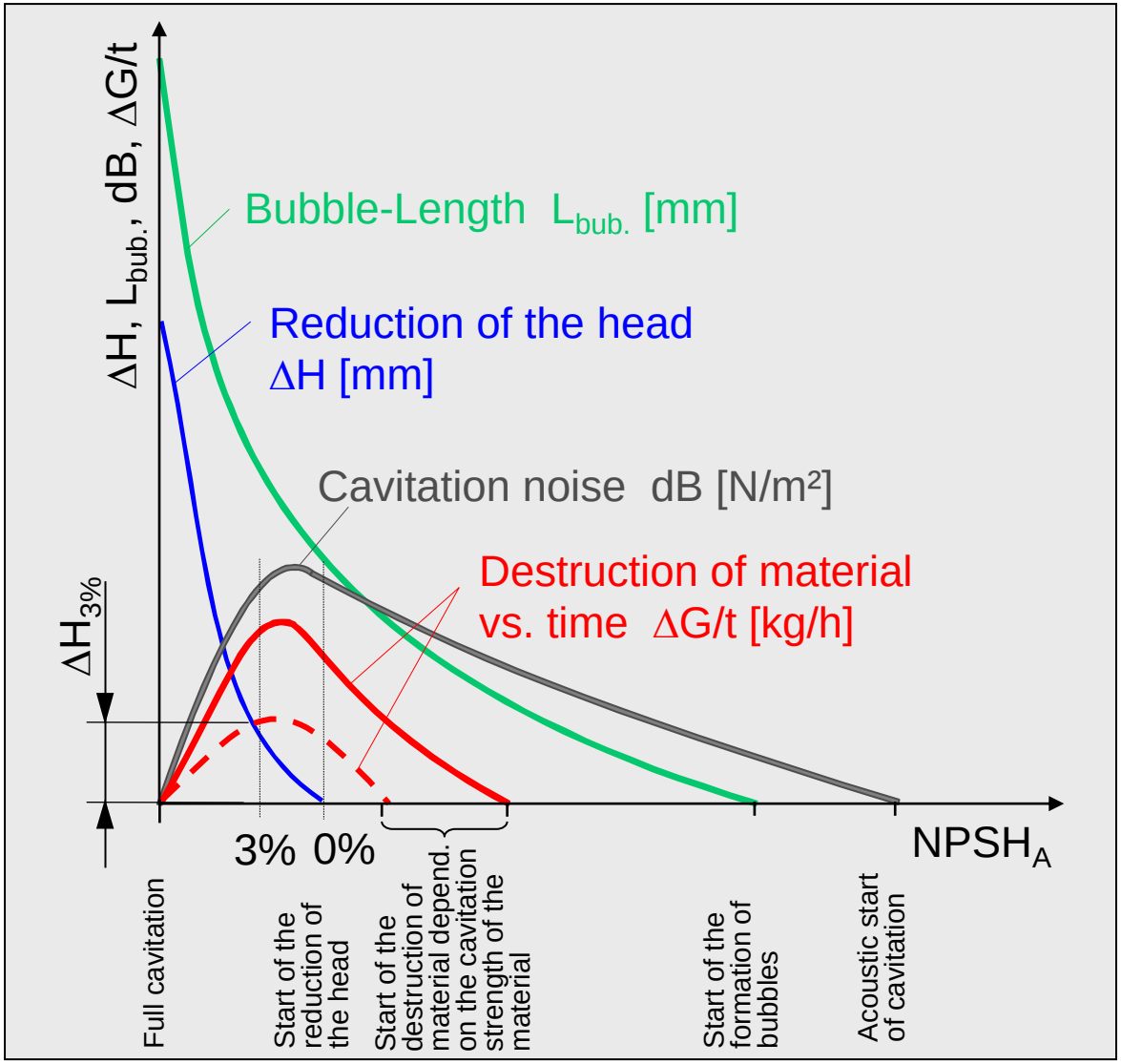


Reduzierung / Zusammenbruch der Funktion einer Strömungsmaschine

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Tafelbild 1
Video

Auswirkungen von Kavitation in Strömungsmaschinen



Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von $NPSH_A$ bei konstante 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.: „Strömungs-maschinen", 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

Problem der Massstabseffekte

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 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.

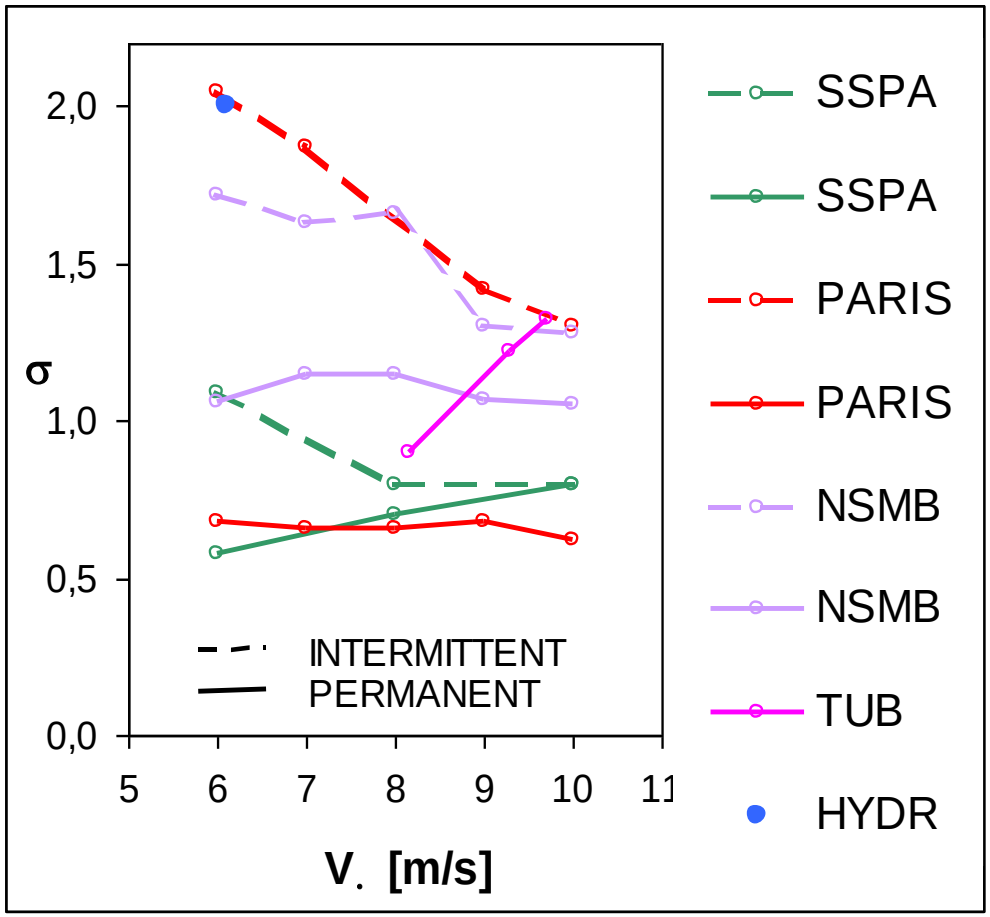
Bewertungsgröße für Kavitation I

Universität Rostock Traditio et Innovatio

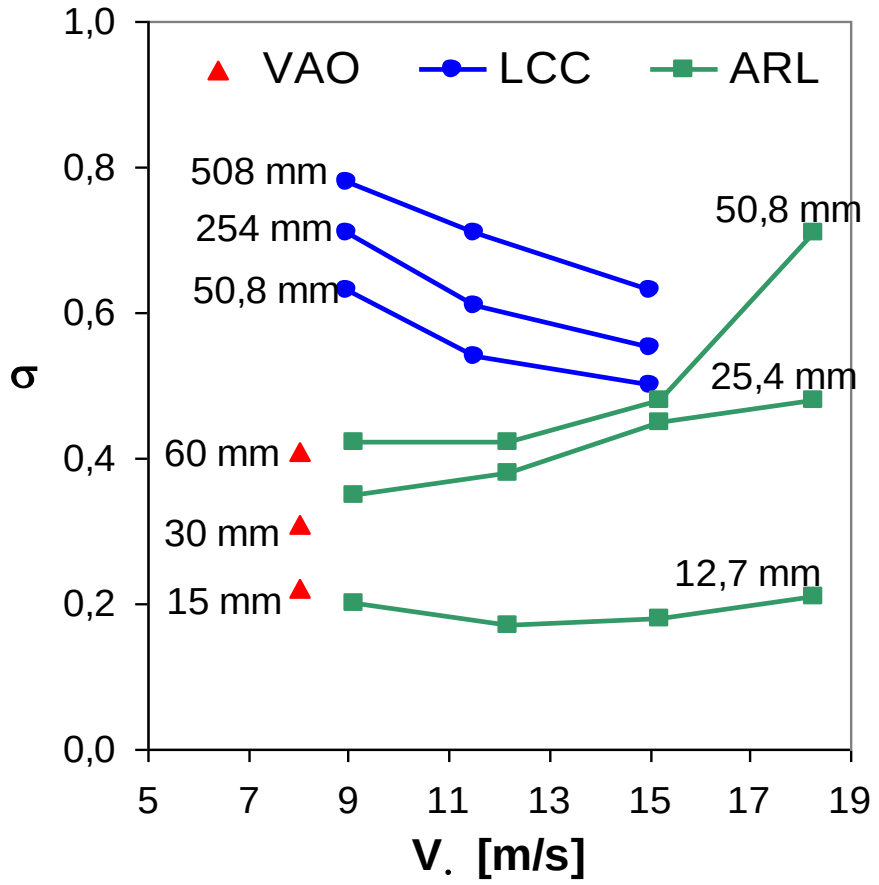
- Kavitationszahl: $\sigma = \frac{p_S - p_D}{0{,}5 \cdot \rho \cdot c_s^2}$, $\sigma \leq 0$ Kavitation

Kavitationszahl, Messergebnisse verschiedener Einrichtungen für dasselbe Bauteil

Universität Rostock Traditio et Innovatio



TIP VORTEX CAV. INCEPTION



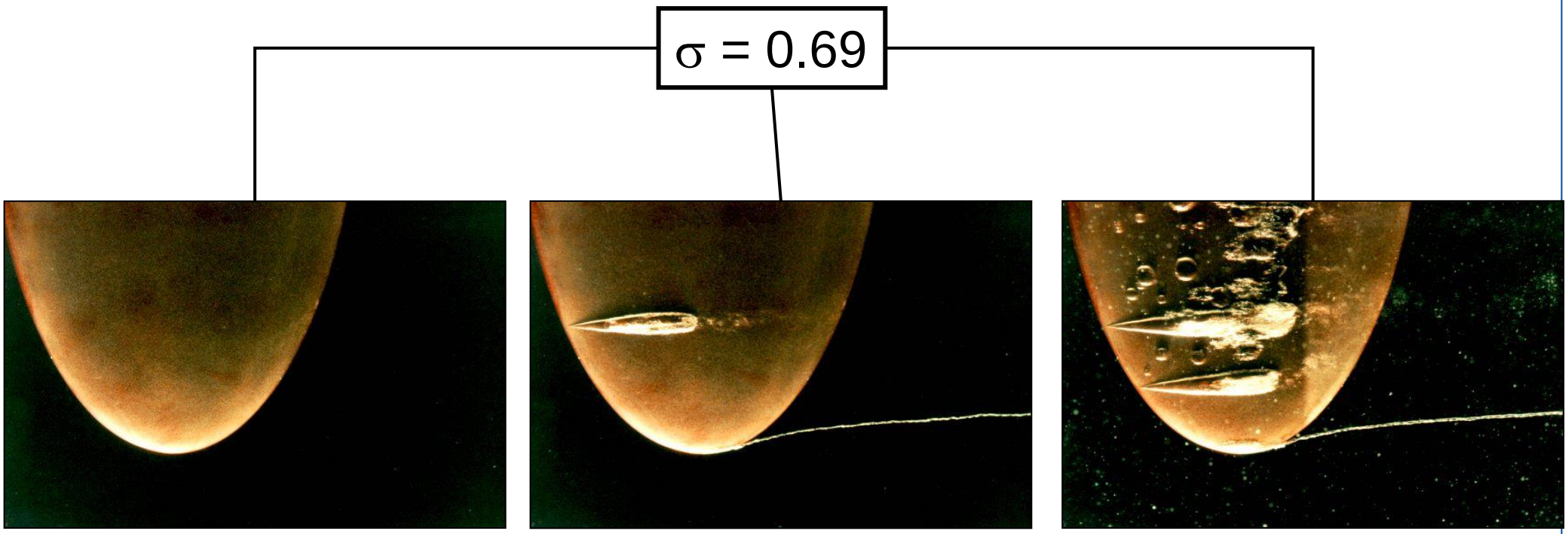
SCHIEBE BODY, CAV. INCEPTION

Quelle: Dr. Keller, TU München

Effekt der Wasserqualität

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Quelle: Dr. Keller, TU München



high tensile strength

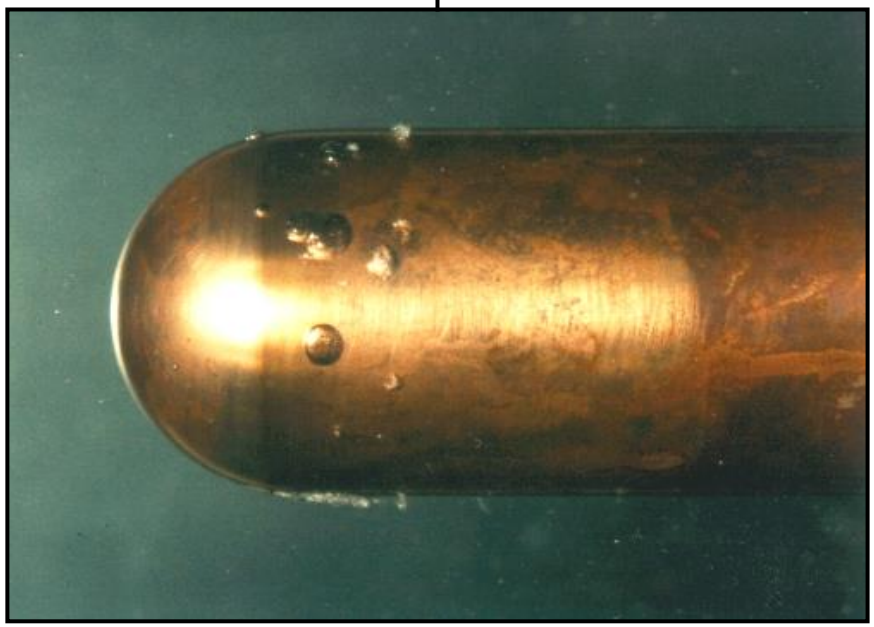
zero tensile strength

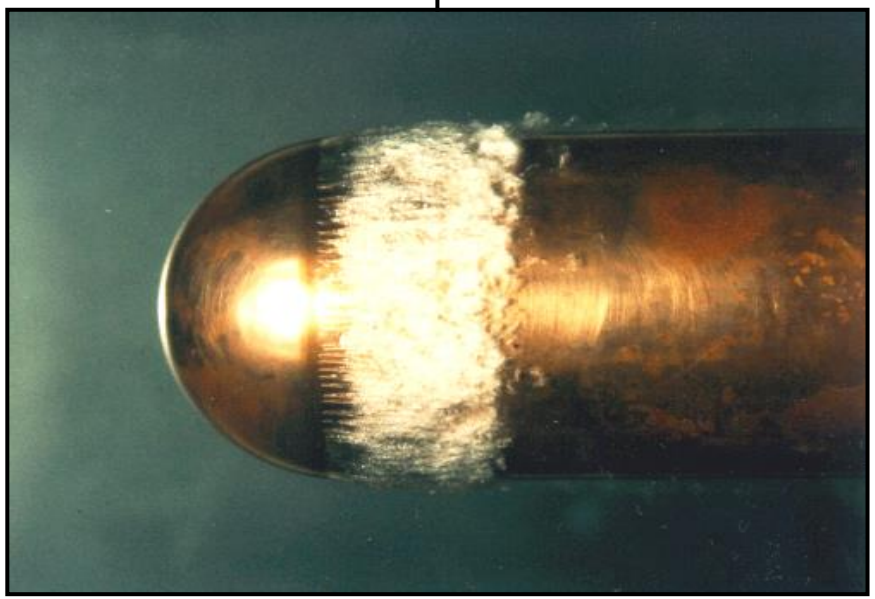
„negative" tensile strength

Geschwindigkeitseffekt (Re-Zahl gleich)

Universität Rostock
Traditio et Innovatio

$\sigma = 0.80$



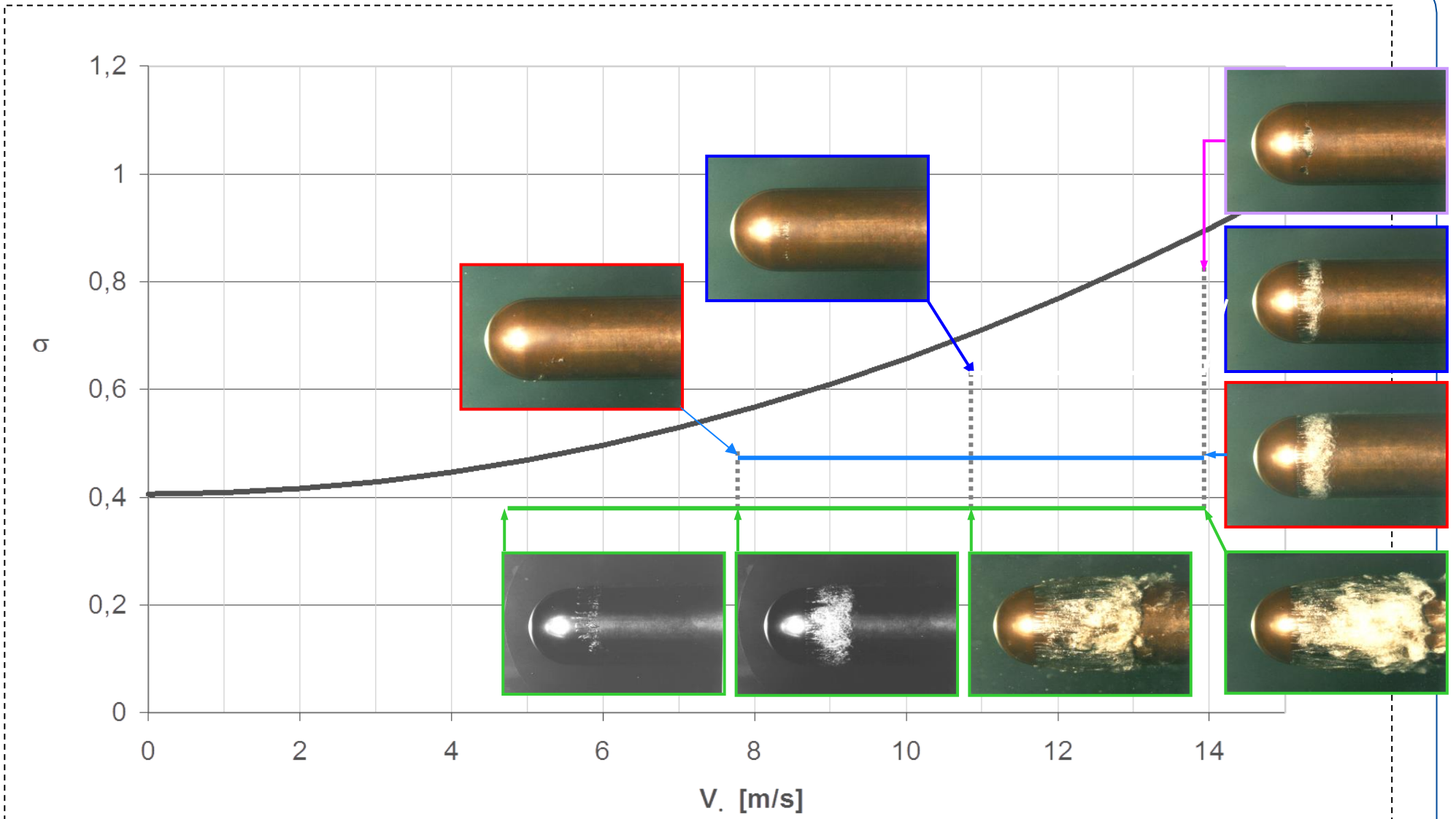


$V_\infty = 8.0$ m/s

$V_\infty = 14.0$ m/s

Quelle: Dr. Keller, TU München

Geschwindigkeitseffekt

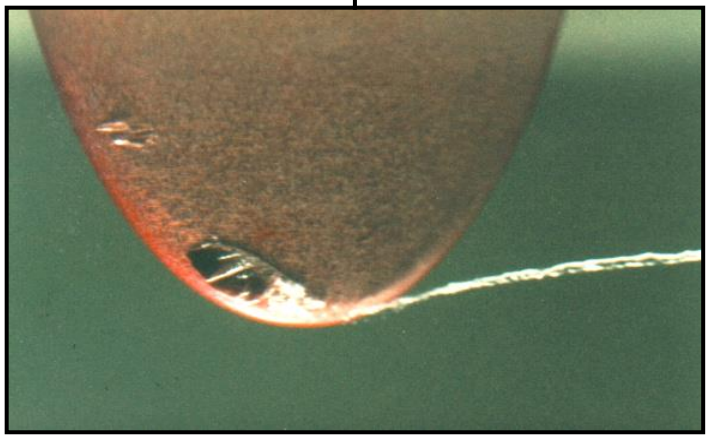


Quelle: Dr. Keller, TU München

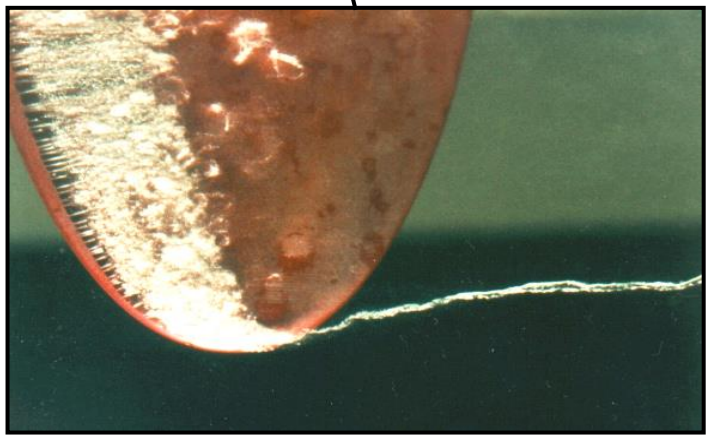
Größeneffekt

Universität Rostock Traditio et Innovatio

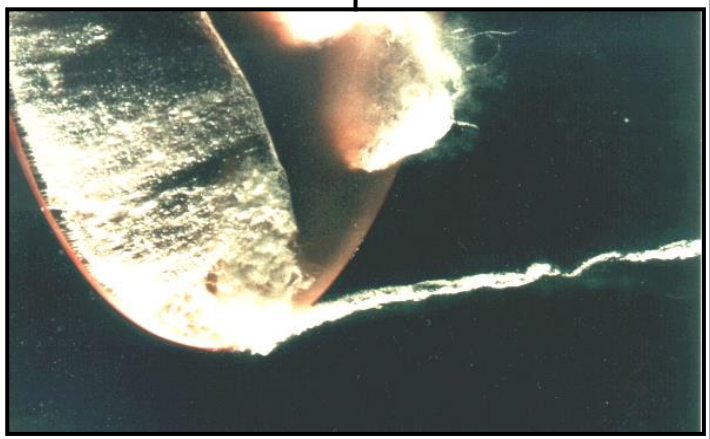
$\sigma = 2.18$, $V_\infty = 11.0$ m/s



max. chord length
50 mm



max. chord length
100 mm

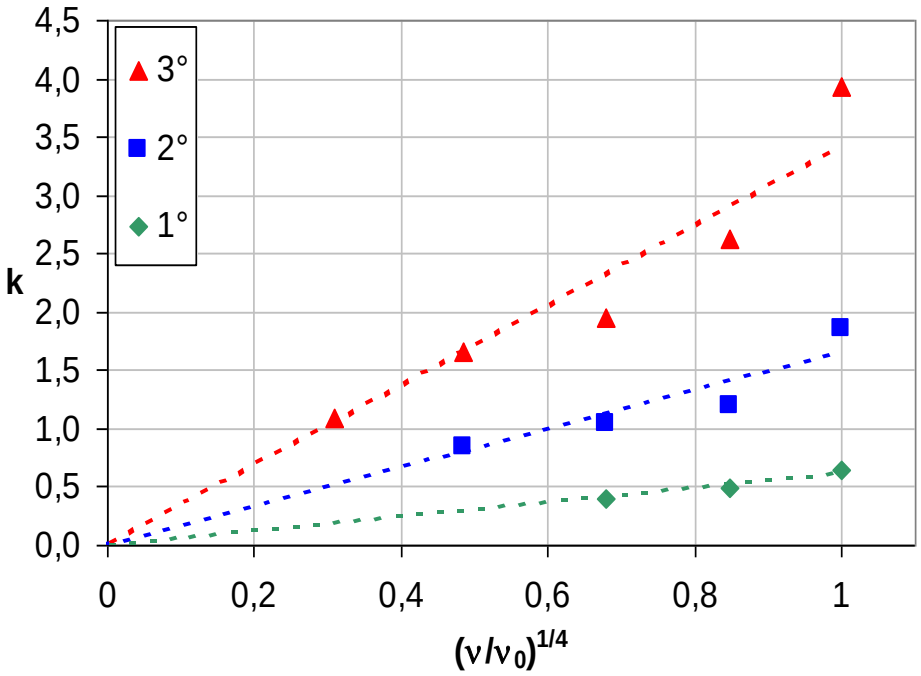


max. chord length
200 mm

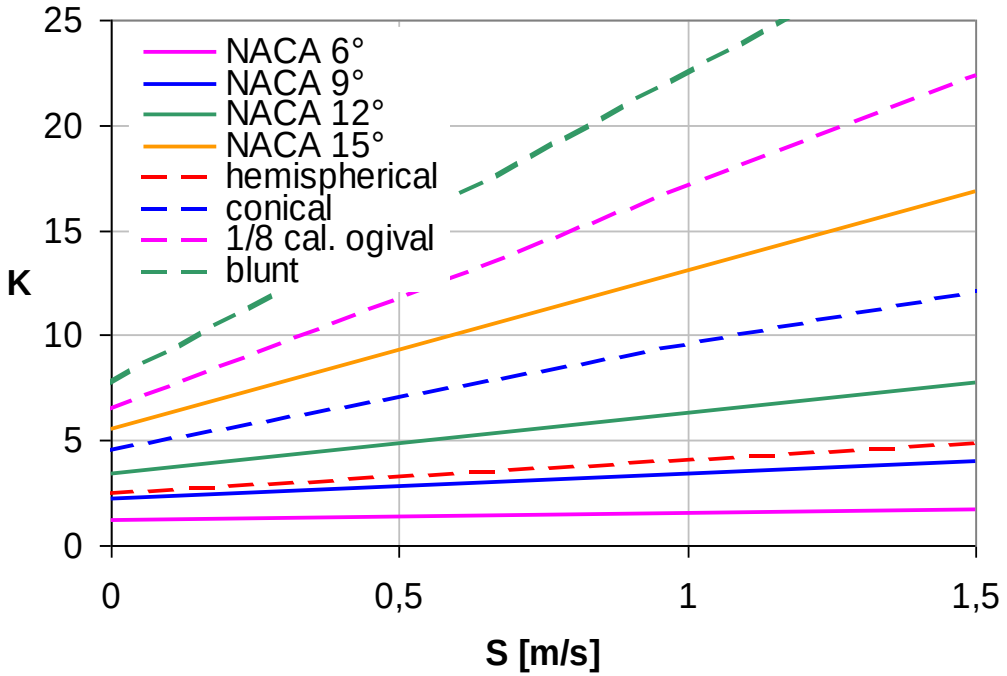
Empirischer Zusammenhang für Turbulenz- und Viskositätseffekt

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Viskosität



Turbulenz



$$k = K\left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^{1/4}$$

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

Quelle: Dr. Keller, TU München

Empirischer Zusammenhang für alle Maßstabseffekte

Universität Rostock Traditio et Innovatio

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

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

$$k = K \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4}$$

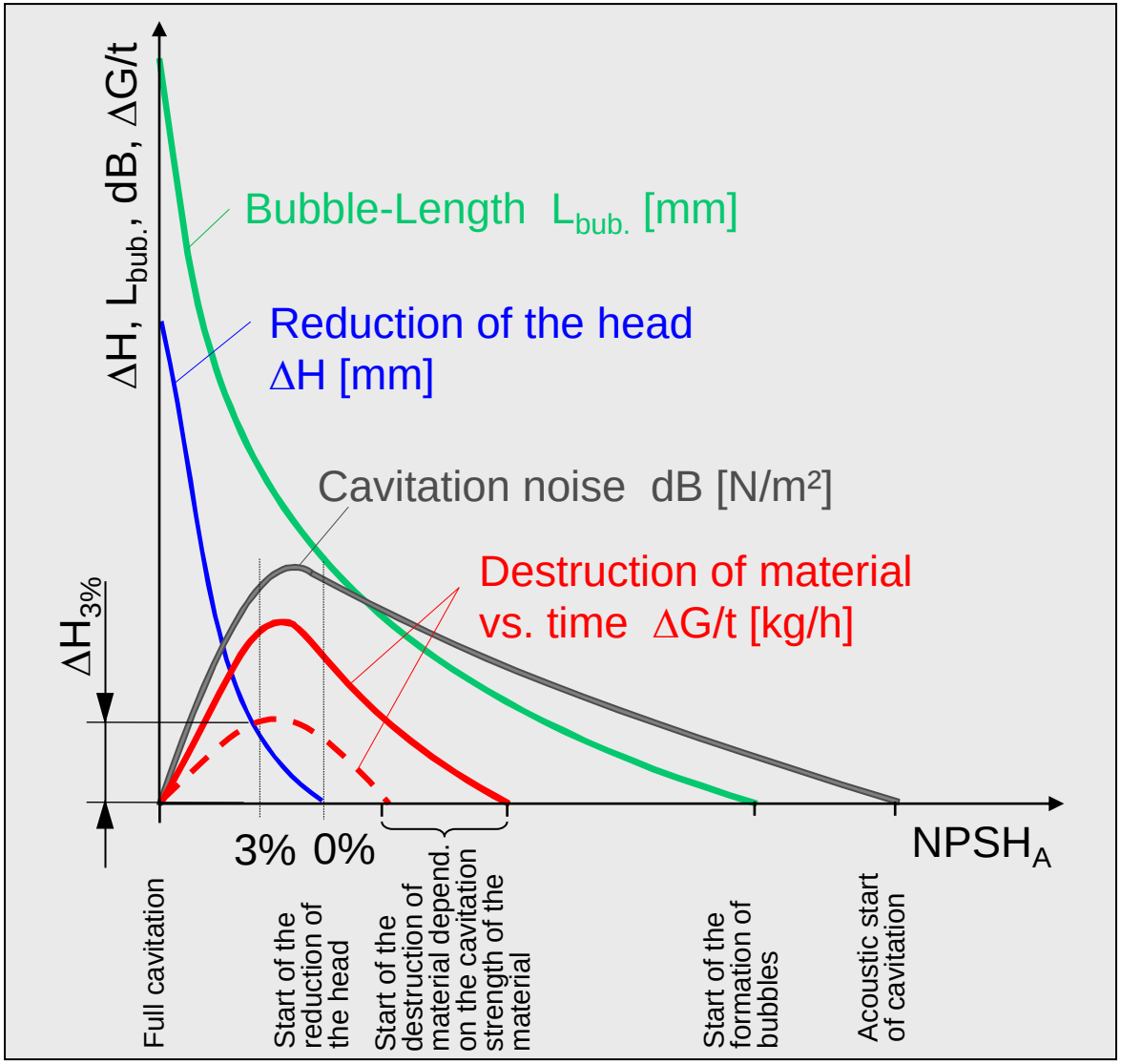
$$K = K_0 \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

0,35<n<0,5

$$\sigma_i = K_0 \left(\frac{L}{L_0} \right)^n \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4} \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

Quelle: Dr. Keller, TU München

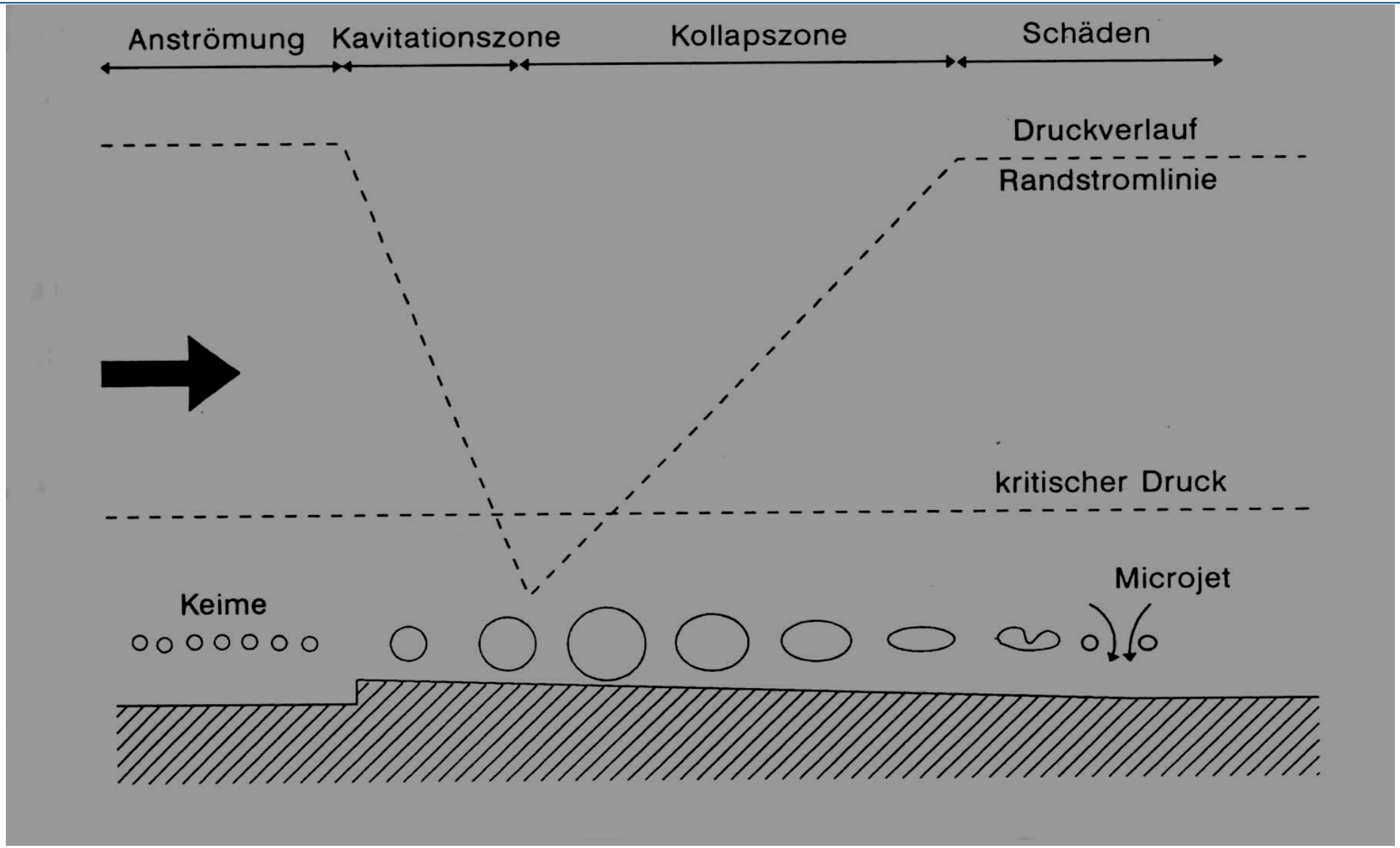
Auswirkungen von Kavitation in Strömungsmaschinen



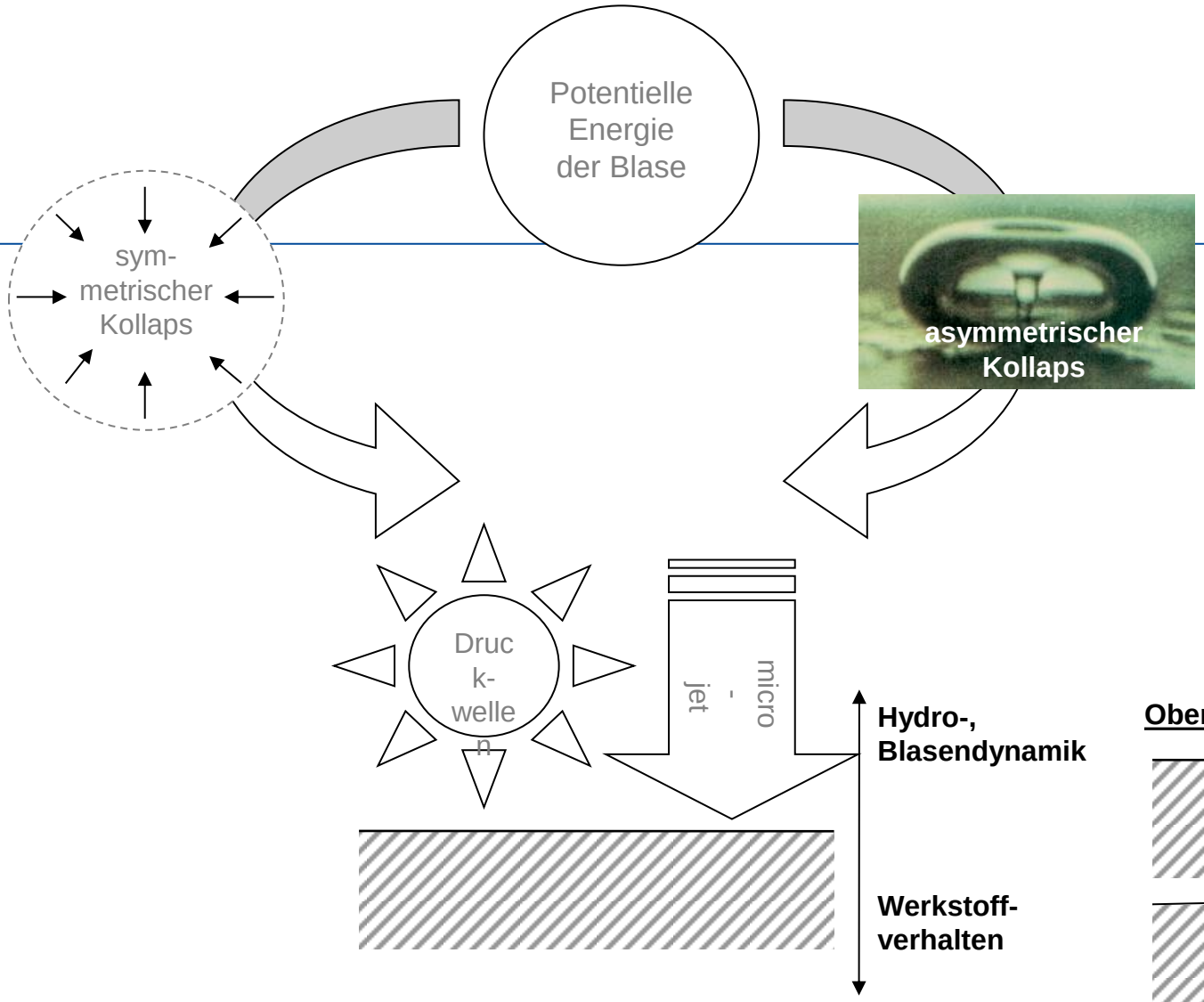
Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von $NPSH_A$ bei konstante Drehzahl und konstantem Förderstrom (nach Florjanic, D.; Gülich, J. und Wesche.: „Beurteilungskriterien für die Wahl des Zulaufdruckes von Kreiselpumpen".
3R International, 27 [1988], Heft 7, S. 502/509)

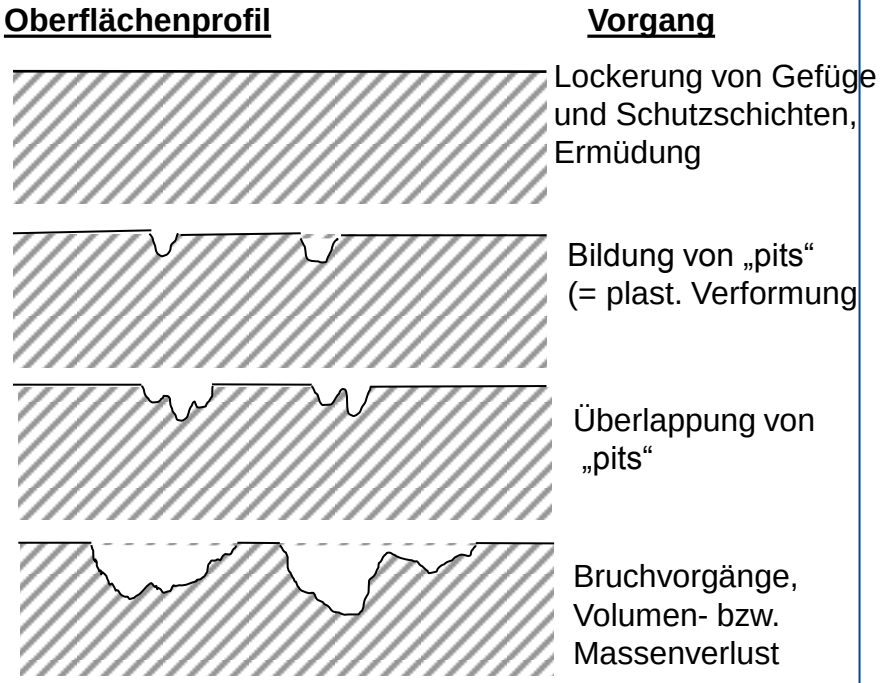
entnommen aus Pfeiderer, C.; Petermann, H.: „Strömungs-maschinen", 6.Auflage

Materialschädigung



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





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

Bewertungsgrößen für die Kavitationswirkung II

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Kavitation hat, wie dargestellt, verschiedene Auswirkungen. Diese können zur Definition von Bewertungsgrößen dienen.

- Beispiele:

  Materialzerstörung – Materialabtrag je Zeiteinheit in m3 an einem Bauwerk

  Reduzierung der Energieübertragung – Verringerung der Förderhöhe von Pumpen

  Schallerzeugung – Schallabstrahlung eines Propellers, z.B. Messung der Verratsreichweite

Bewertungsgrößen für die Reduzierung der Energieübertragung von Pumpen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 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- Werte

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- $NPSH_{vorh}$ ist die Haltedruckhöhe, die eine Anlage zur Verfügung stellt.
- $NPSH_{erf}$ 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. $NPSH_{erf,H3\%}$ … 3% Abfall der Förderhöhe
- Für einen dauerhaft sicheren Pumpenbetrieb muss

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

sein.

NPSH- Werte

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- $NPSH_i$ 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

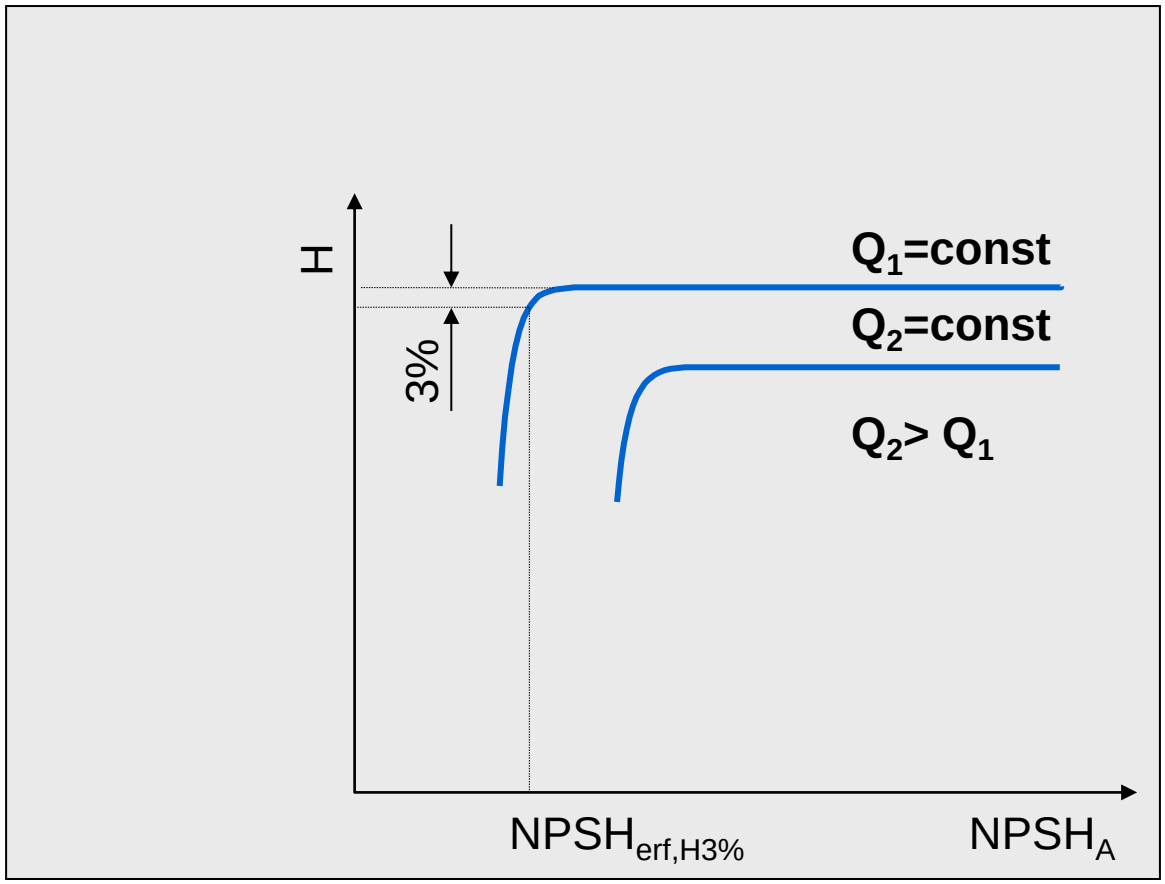
  Materialabtrag
  Geräuschemission
  Lebensdauer

Messung des $NPSH_{erf,H3\%}$-Wertes für Kreiselpumpen

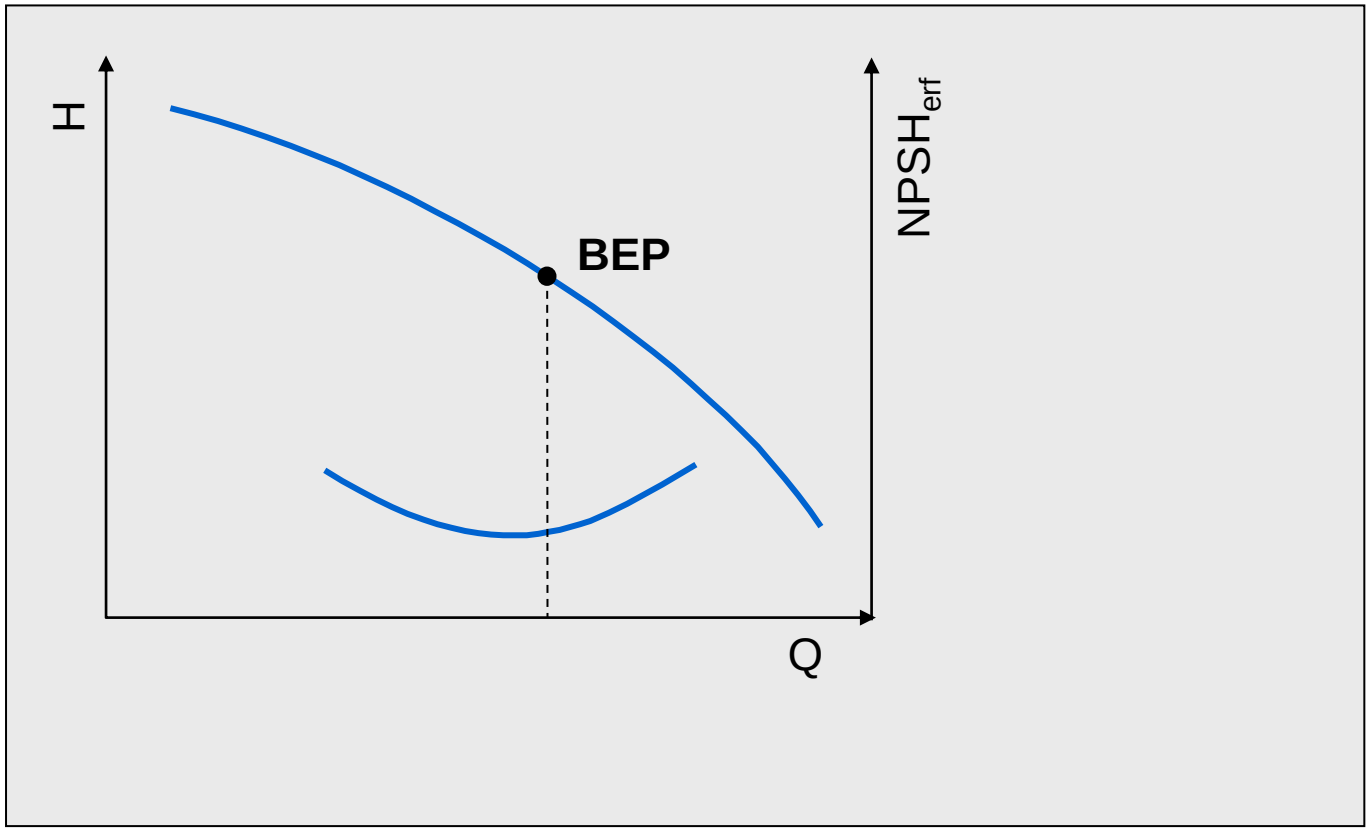
Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 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 $NPSH_{erf,H3\%} = f(Q)$-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 $NPSH_{erf} = f(Q)$ einer Kreiselpumpe



Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation

1) Anlage

- Erhöhung des $NPSH_{vorh}$, 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.

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

ρ … Gemischdichte ; α… Gasvolumenanteil