

Sommersemester 2011

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Kraft- und Arbeitsmaschinen,
Teil Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- Strömungsmaschinen in Anlagen
- Energieübertragung und Verluste
- **Pumpen ; Kavitation**
- Windkraftanlagen
- Windkraftanlagen und Zusammenfassung

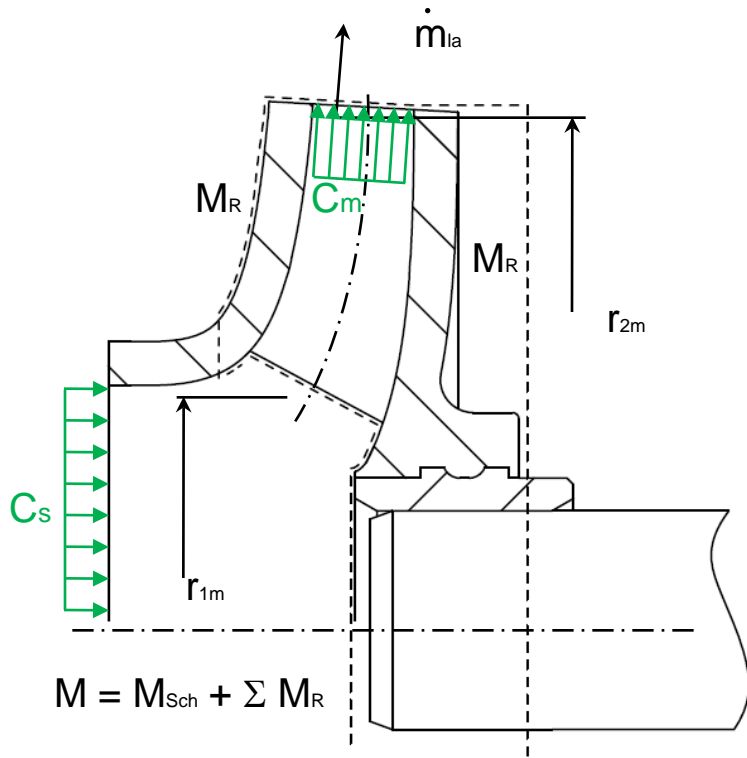


Eine analoge Aussage gilt für den Zusammenhang von Drehimpuls und Moment

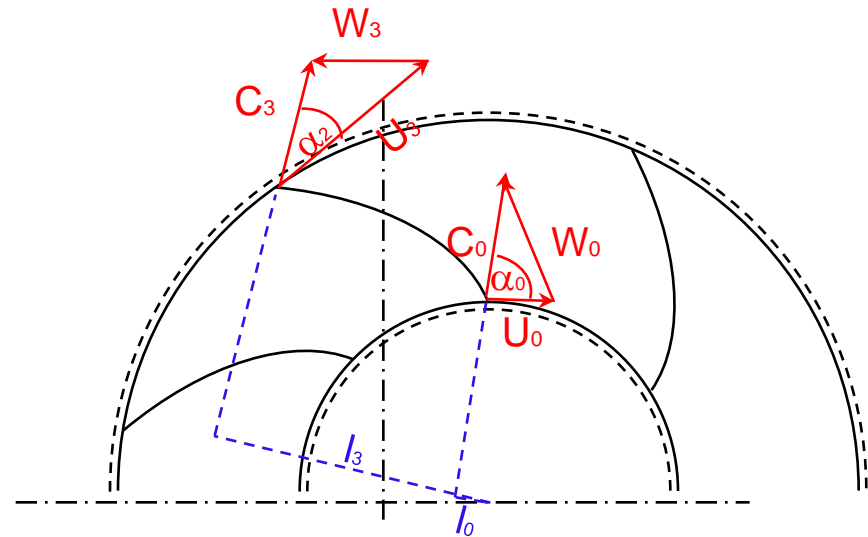
Drehimpuls $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{l}$

Drehimpulssatz $\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M}$

Die zeitliche Änderung des Drehimpulses (Impulsmoments) einer Masse m ist gleich dem resultierenden Moment (bezogen auf einen Bezugspunkt O).



Kontrollvolumen



$$M = M_{\text{sch}} + \Sigma M_R \quad \text{an der Welle übertragenes Moment}$$

$$M_{\text{sch}} = \dot{m} (r_{2m} \mathbf{c}_{3u} - r_{1m} \mathbf{c}_{ou}) \quad \text{von den Schaufeln übertragenes Moment}$$

mit $u = \omega r$

$$P_{\text{sch}} = M_{\text{sch}} \cdot \omega = \dot{m} (u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{ou}) \quad \text{Leistung}$$

$$Y_{\text{sch}} = \frac{P_{\text{sch}}}{\dot{m}} \quad \text{spezifische Förderarbeit}$$

Euler'sche Turbinengleichung (1754)

$$Y_{\text{sch}} = u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{ou}$$

wichtige Kennlinien von Pumpen

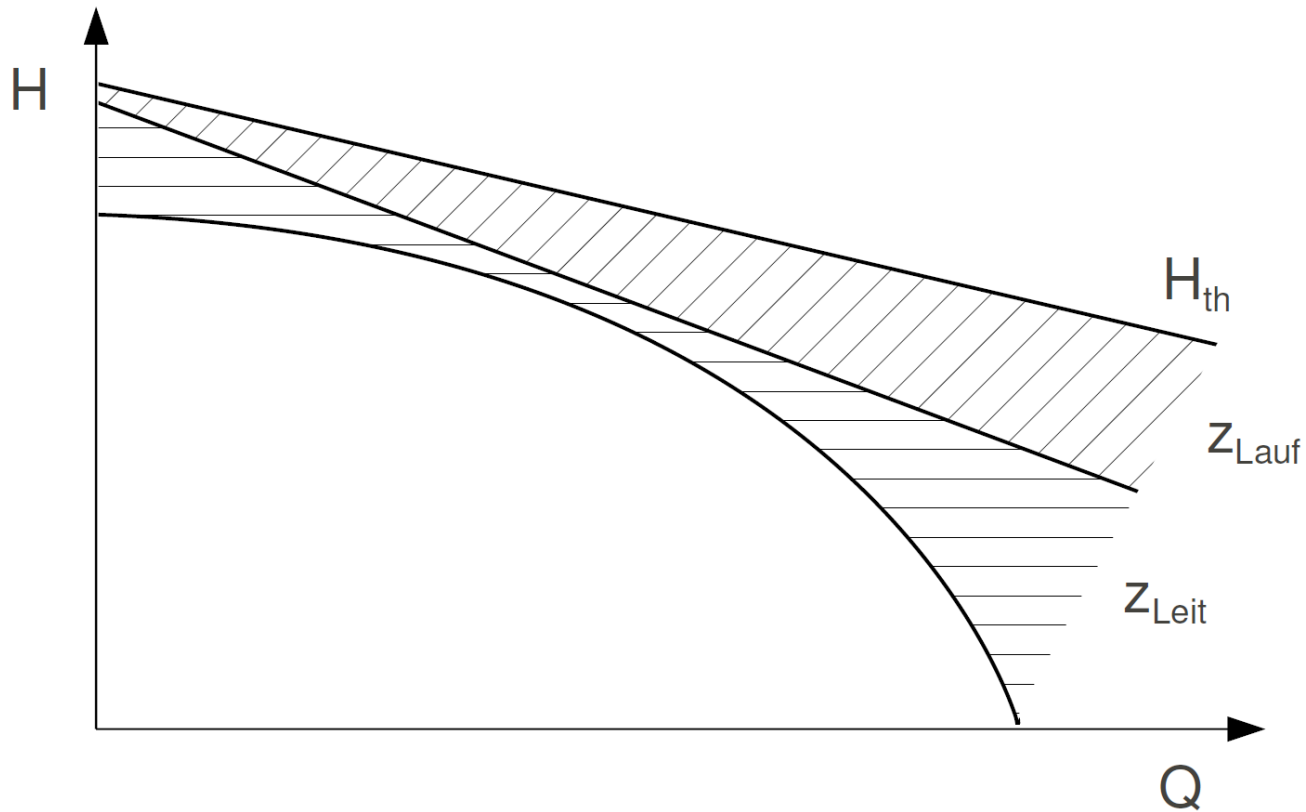
- $H = H(Q)$

- $\eta = \eta(Q)$

- $P = P(Q)$

- $NPSH = NPSH(Q)$

ideale und reale $H=f(Q)$ - Kennlinie



Minderumlenkung, Deviationswinkel – Verhältnisse am LR- Austritt

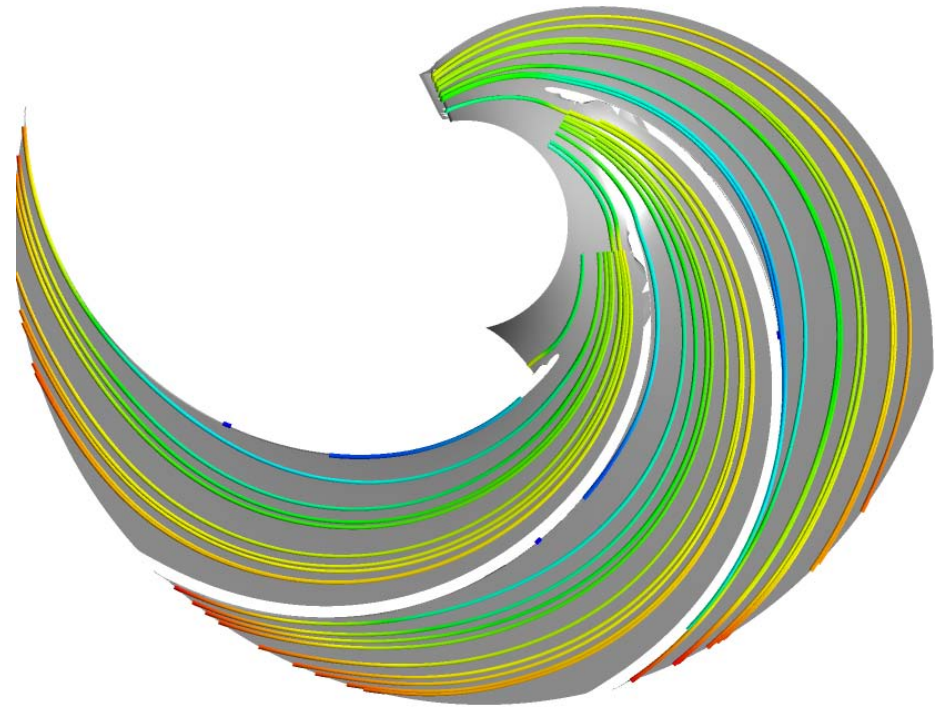
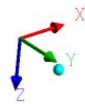
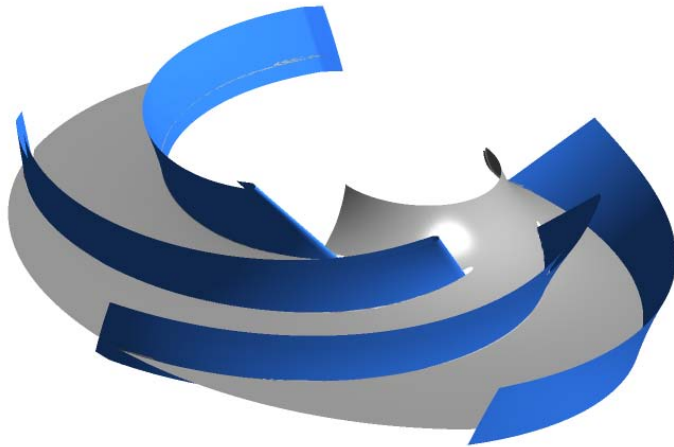
In der Realität ist die Abströmung aus dem Laufrad nicht schaufelkongruent.

- Ursachen: 1) der relative Kanalwirbel (Sekundärströmung von der SS zur DS durch Corioliskräfte)
2) Reduzierung des Druckunterschiedes zwischen SS und DS im „Schrägabschnitt“

Deviationswinkel:

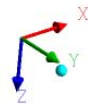
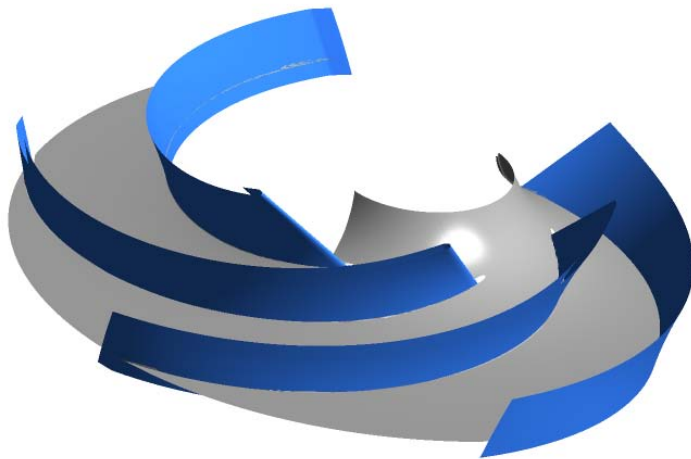
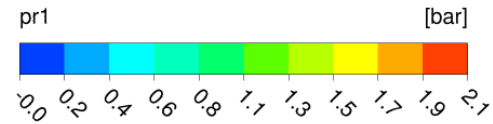
$$\delta = \beta_S - \beta_3$$

$$\beta_S = \beta_2$$



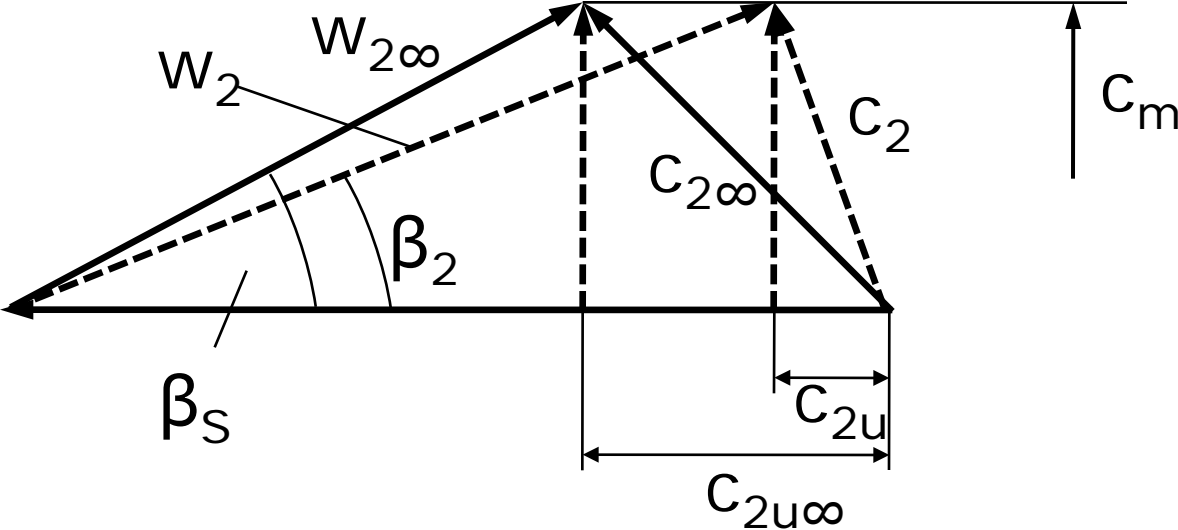
Radialrad mit Schaufeln

Minderumlenkung



Radialrad

Statischer Druckaufbau in den Laufradkanälen



Verfahren von Pfeleiderer, Stepanoff, Gülich

- ▶ Exemplarisch wird das Verfahren von Pfeleiderer gezeigt



$$Y_{th\infty} = u_2 c_{3u} - u_1 c_{0u}$$

$$Y_{th} = \frac{Y_{th\infty}}{p + 1}$$

Verfahren von Pfeleiderer

$$p = \frac{Y_{h\infty}}{Y_h} - 1 \quad p = \psi' \frac{r_2^2}{Z \cdot S}$$

Kreiselpumpe mit beschaufeltem

Leitrad

$$\psi' = 0,6 \left(1 + \frac{\beta_2^\circ}{60}\right)$$

Spiralgehäuse

$$\psi' = (0,65 \dots 0,85) \left(1 + \frac{\beta_2^\circ}{60}\right)$$

schaufellosem Diffusor

$$\psi' = (0,85 \dots 1,0) \left(1 + \frac{\beta_2^\circ}{60}\right)$$

Statisches Moment der Stromlinie

$$S = \int_{r_1}^{r_2} r \, dx \Rightarrow S = \sum_{r_1}^{r_2} r \, \Delta x$$

„incidence“

- Verhältnisse am LR-Eintritt

$$Q = c_m \cdot A$$

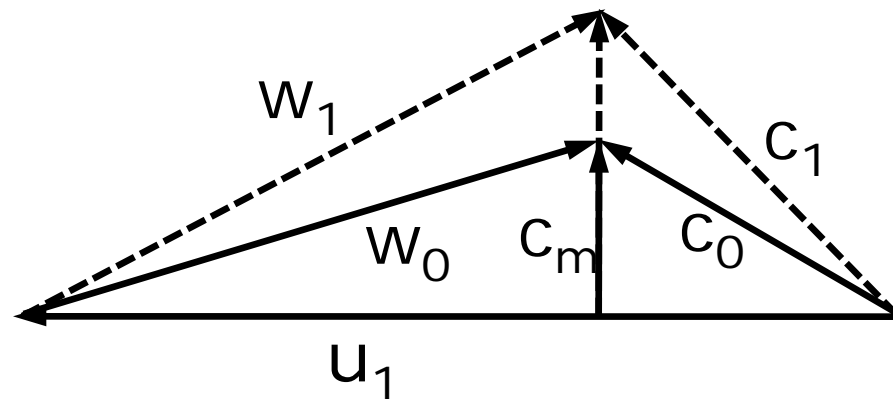
c_{0m} erhöht auf c_{1m} durch Schaufelversperrung

$$c_{1m} = \tau_1 \cdot c_{0m}$$

$$\beta_0 = \arctan \frac{c_{0m}}{u_1 - c_{0u}}$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}}, c_{1u} = c_{ou}$$

$$\tau_1 = \left(1 - \frac{z_{La} \cdot s_1}{\pi d_1 \sin \beta_1 \sin \lambda_1} \right)^{-1}$$





Grundlagen der Kavitation

- lat. cavitare = aushöhlen
- Kavitation ist die teilweise Verdampfung von Flüssigkeit in einem durchströmten System

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

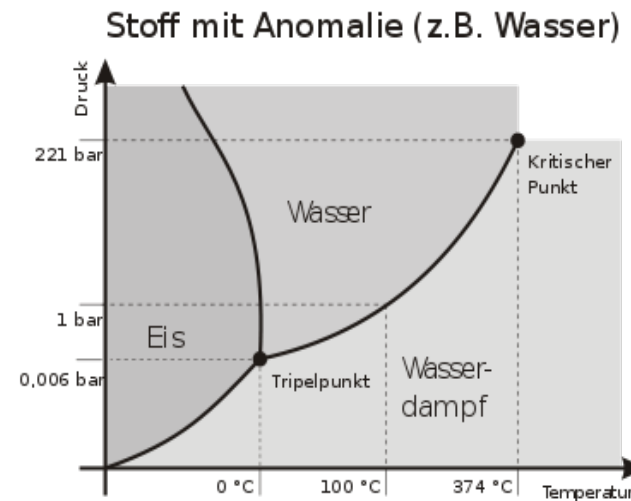
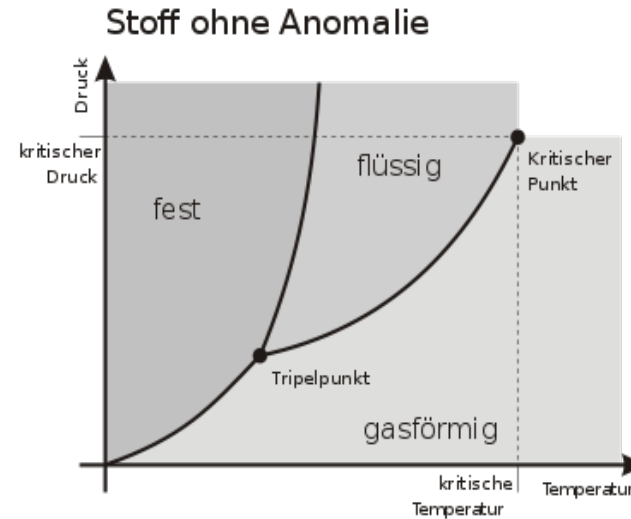
1) Energieerhaltungssatz in der Form

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

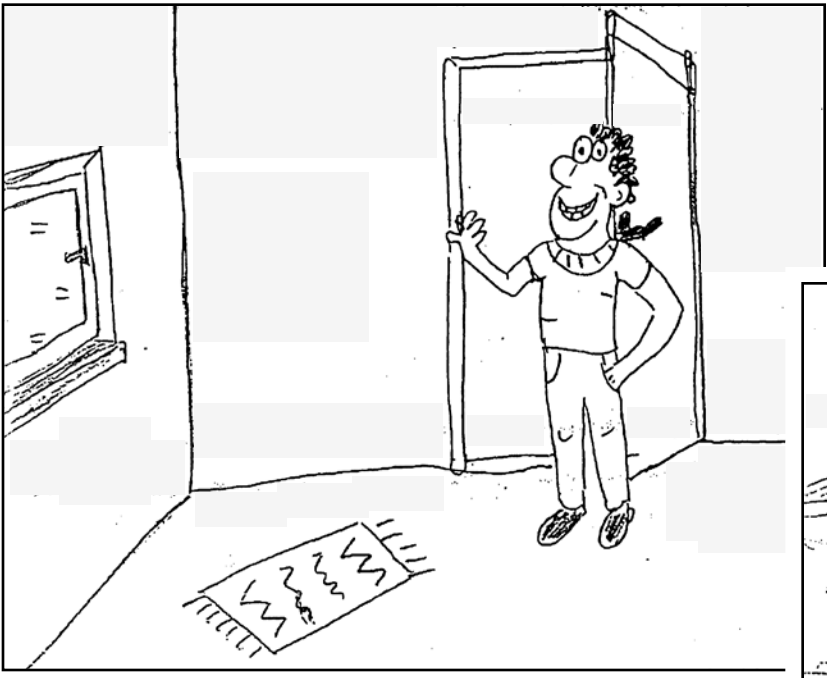
(Beziehung zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit)

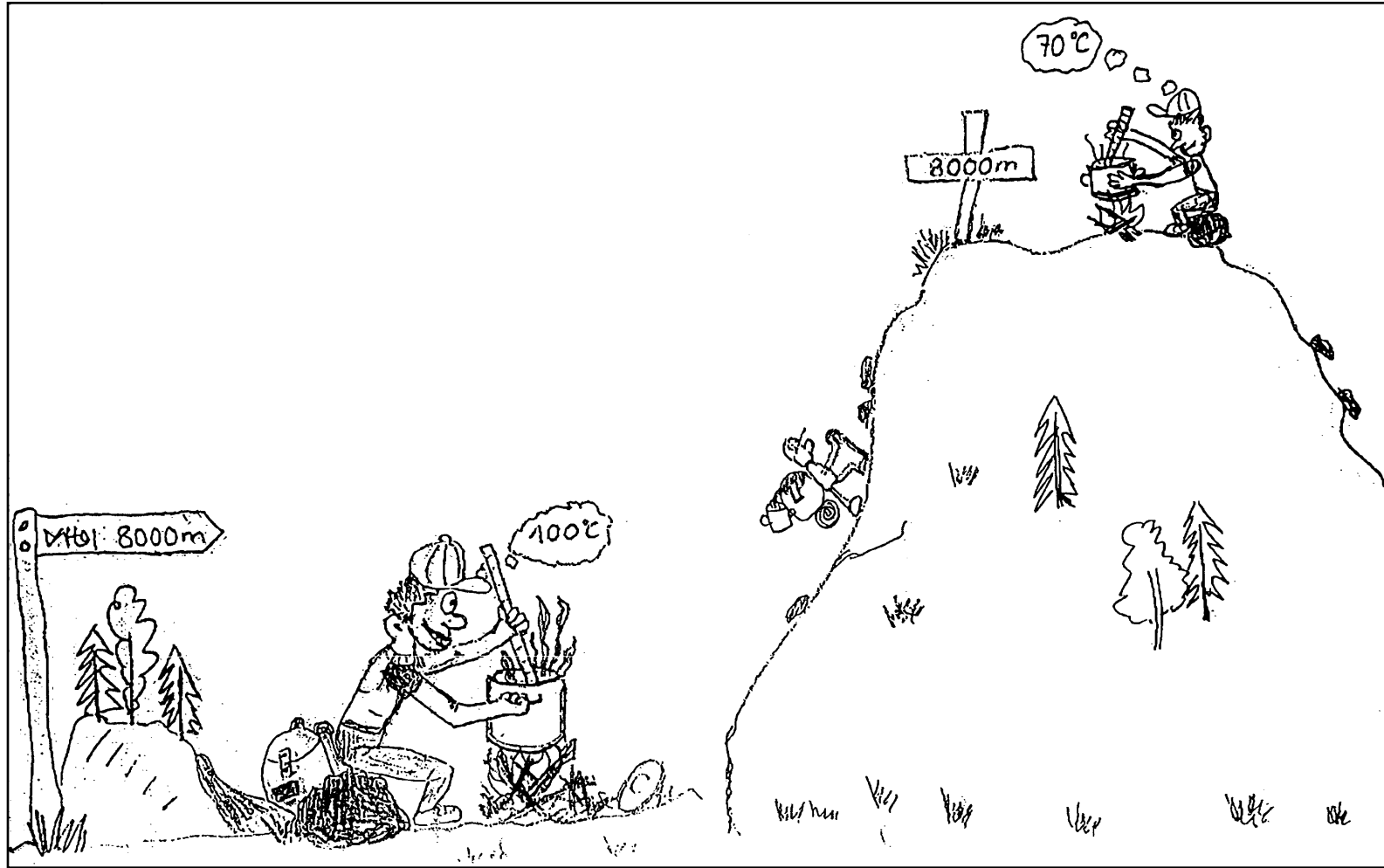
2) Abhängigkeit des Sättigungsdruckes (Dampfdruckes) von der Sättigungstemperatur

Aggregatzustand abhängig von Druck und Temperatur

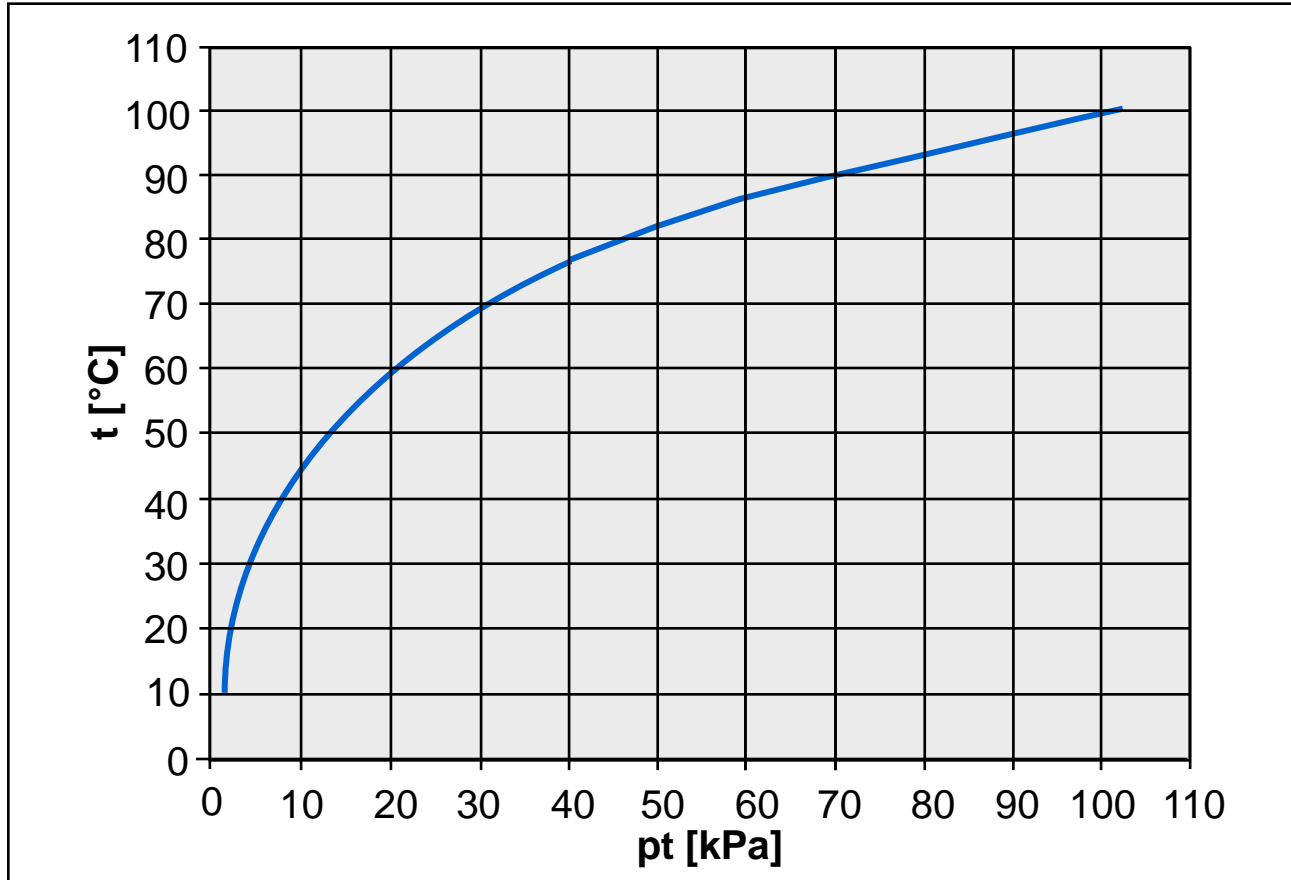


aus WIKIPEDIA





Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur





Das Verständnis der dargestellten Zusammenhänge erlaubt einen grundlegenden Einblick in die Mechanismen von Kavitationsvorgängen

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



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)

Effekte:

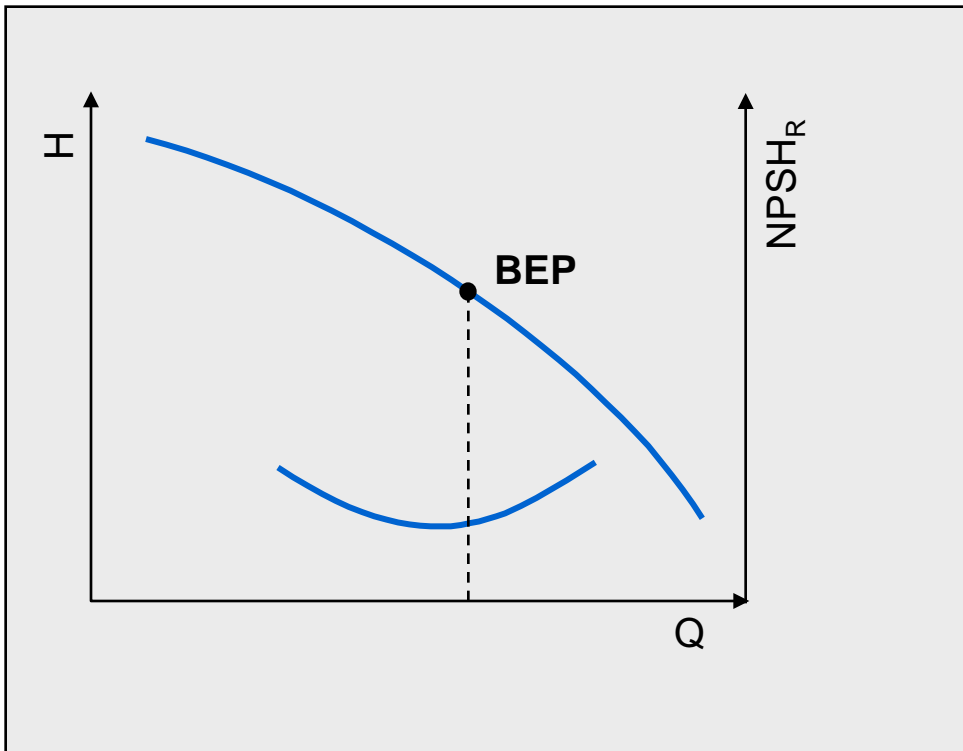
- ▶ Geräusche
- ▶ Zerstörung des Materials
- ▶ Störung der Funktion von Maschinen und Ventilen

- Kavitationszahl: $\sigma = \frac{p - p_D}{\frac{1}{2} \rho c^2}$ $\sigma \leq 0$ Kavitation

- NPSH (net positive suction head, Haltedruckhöhe):

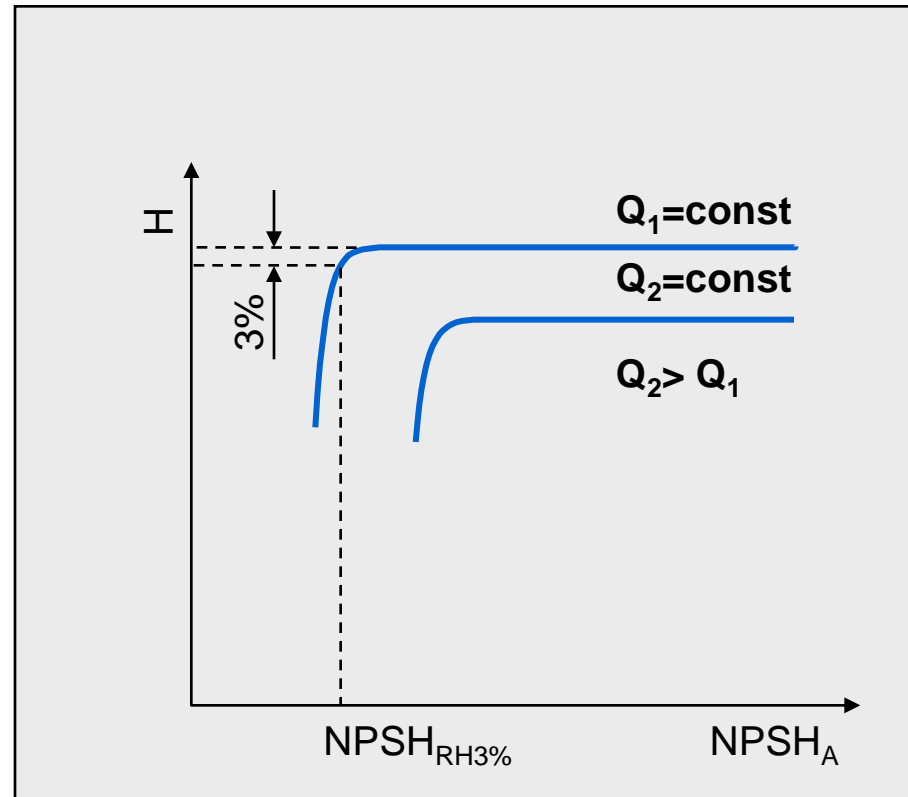
$$\text{NPSH} = \frac{p - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{c^2}{2g}$$

- $NPSH_A$... Wert, der in der Anlage durch den Systemdruck zur Verfügung steht
- $NPSH_r$... Wert, den das Laufrad „benötigt“, um kavitationsfrei zu arbeiten
- $NPSH_i$... visueller Kavitationsbeginn
- $NPSH_3$... 3% Abfall von Förderhöhe bzw. Wirkungsgrad
- $NPSH_{vk}$... Vollkavitation, weitgehend Zweiphasenströmung im Laufrad
- definierte Maße von Materialabtrag
 Geräuschemission
 Lebensdauer



Typische NPSH-Kennlinie einer
Kreiselpumpe

Messung des NPSH-Wertes
unter Berücksichtigung
des 3% H-Kriteriums



Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation

1) Anlage

- ▶ Erhöhung des NPSH_A , 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.

Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

2) Maßnahmen des Pumpenherstellers zur Verringerung von $NPSH_{\text{erf}}$.

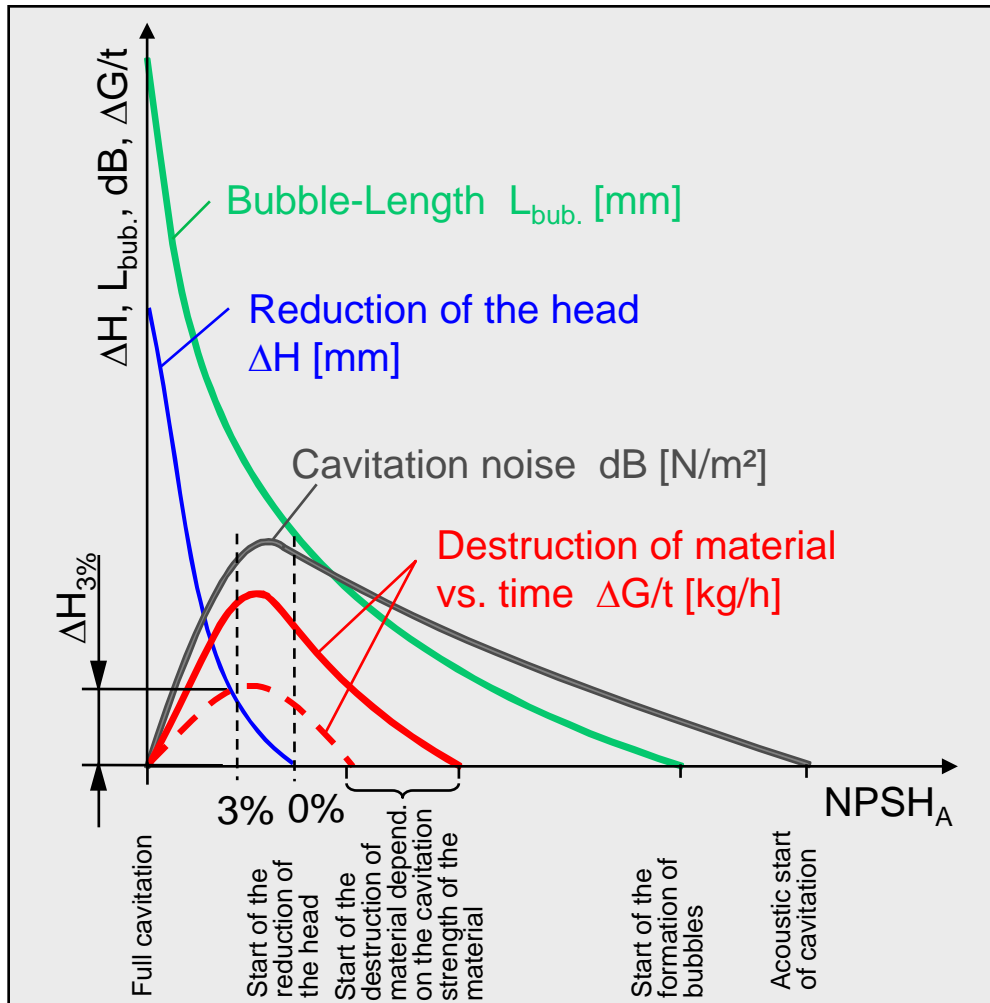
- ▶ Geeignete Drehzahl
- ▶ Zweiflutiges Laufrad
- ▶ Sauglaufrad
- ▶ Spezielle Profile für die Schaufeln
- ▶ Inducer
- ▶ Optimale Gestaltung des Einlaufgehäuses und des Laufrades
- ▶ etc.

Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

Möglichkeiten zur Verzögerung von Materialschäden

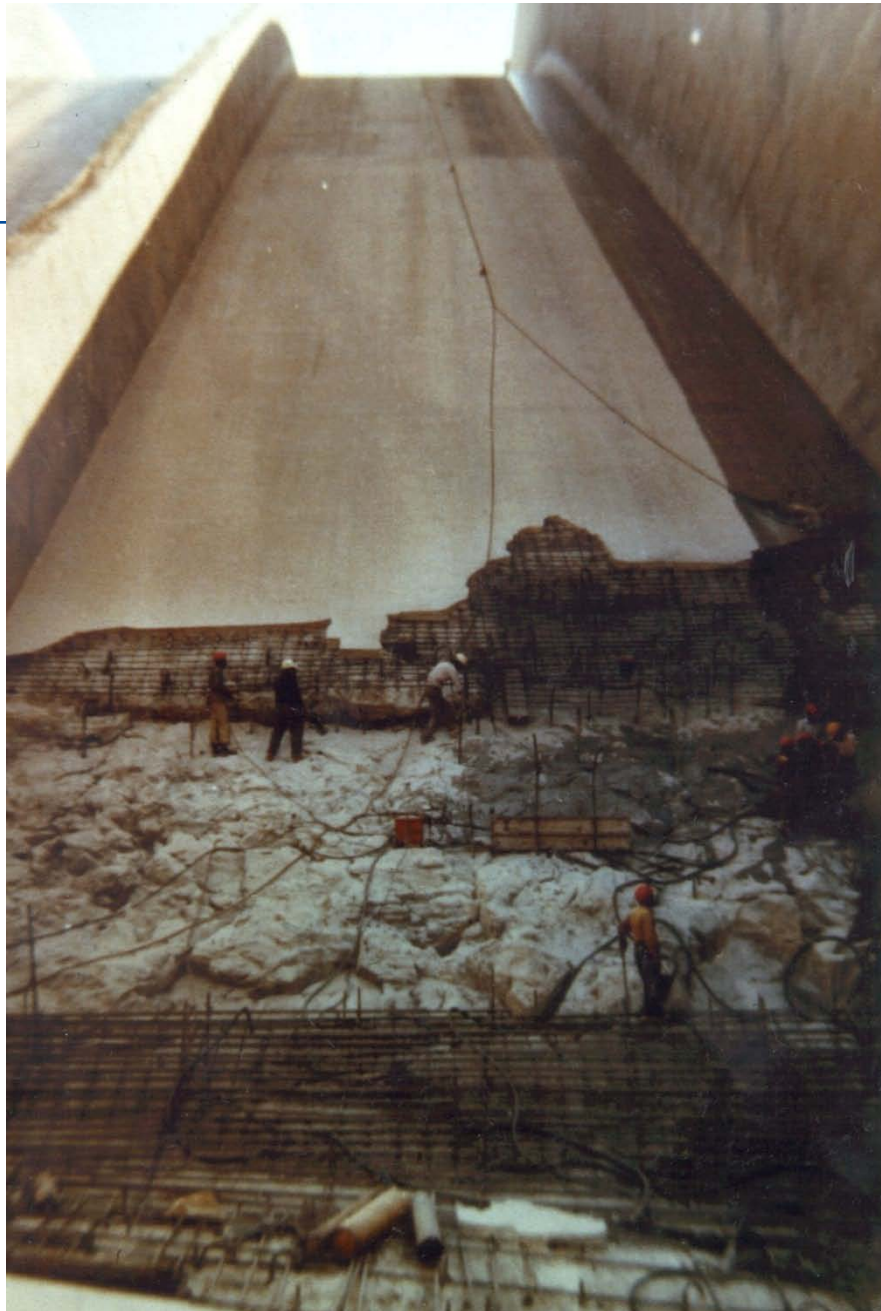
- ▶ Verwendung eines "kavitationsfesten" Werkstoffes (evtl. nur für die 1. Stufe)

Besonders "kavitationsfest" sind z.B.: gewalztes Stellite, Al-Gußbronze, 13 Cr-Stahlguß (vgl. Tillner, W. "Vermeidung von Kavitationsschäden", in German)



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



Dieses und die folgenden Bilder sind einem Crash-Kurs „Kavitation“ von Herrn Dr. Keller, TU München bei der WILO SE entnommen.

