

# Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

## 6. Kavitation

### Lehrstuhl Strömungsmaschinen

# Gliederung der Vorlesung

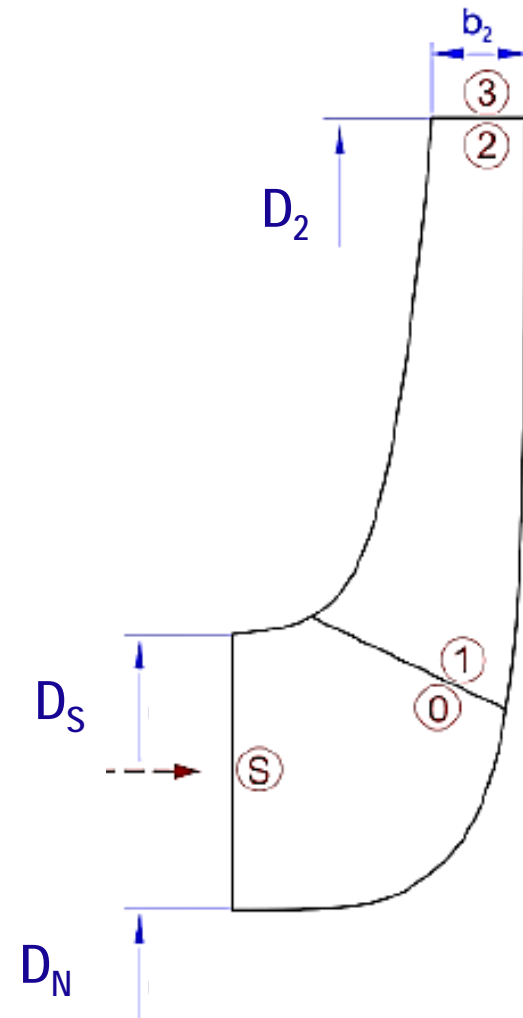
1. Einführung, Einteilung, Historische Entwicklung, Aufbau und Wirkungsweise
2. Strömungsmechanische Grundlagen
3. Energieübertragung am Rotor, Ableitung der Euler'schen Turbomaschinengleichung
4. Ähnlichkeitsmechanik
5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte, Verluste
6. Kavitation
7. Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung
8. Strömungsmaschinen (Pumpe, Verdichter, Flugzeugtriebwerk)
9. Dampfturbinen
10. Windturbinen
11. Sonderbauarten (Strömungswandler, Seitenkanalmaschinen, Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbinen)
12. Zusammenfassung

# Wiederholung

# Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Hauptabmessungen:

- Nabendurchmesser
- Saugmunddurchmesser
- Austrittsbreite
- Laufraddurchmesser

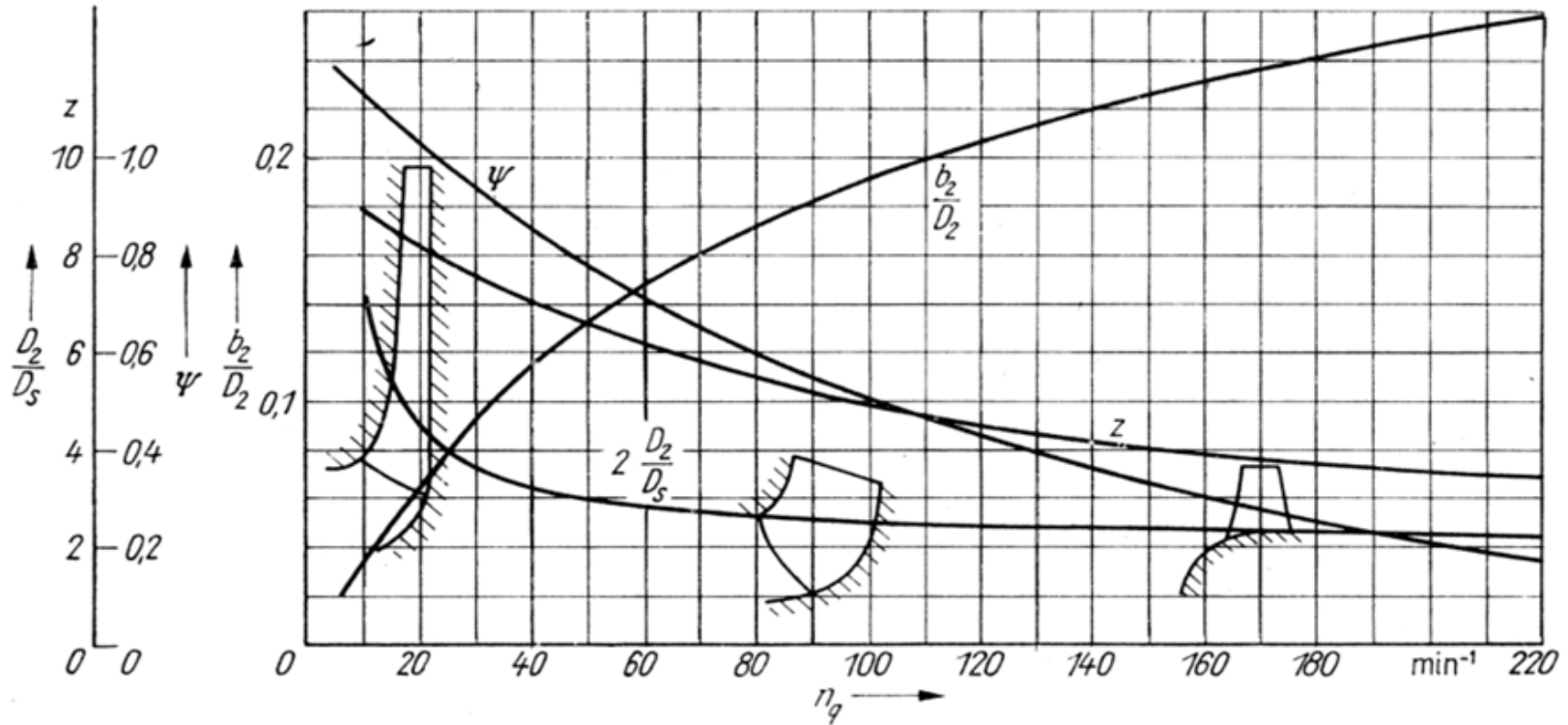


# Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Verfahren zur Bestimmung der Hauptabmessungen:

- Nutzung des Cordier-Diagramms
- Nutzung von Diagrammen und Erfahrungswerten

## Kreiselradpumpen



entnommen aus Prager, R.: Technisches Handbuch Pumpen

*Hauptabmessungen über der spezifischen Drehzahl aufgetragen*

## 6.1 Grundlagen der Kavitation

Was ist Kavitation?

Welche Auswirkungen hat die Kavitation auf den  
Betrieb einer Anlage?

# Grundlagen der Kavitation

## Definition:

Ausbildung örtlicher Dampfblasen (Hohlraumbildung) in strömenden Flüssigkeiten, wenn der statische Absolutdruck den Dampfdruck erreicht bzw. unterschreitet.



*Kavitation an einem Propeller*

[WIKIMEDIA]

# Grundlagen der Kavitation



Kavitation an einem  
Axiallaufrad aus  
Versuchen am Lehrstuhl  
Strömungsmaschinen

# Grundlagen der Kavitation

## Zwei physikalische Phänomene von Bedeutung:

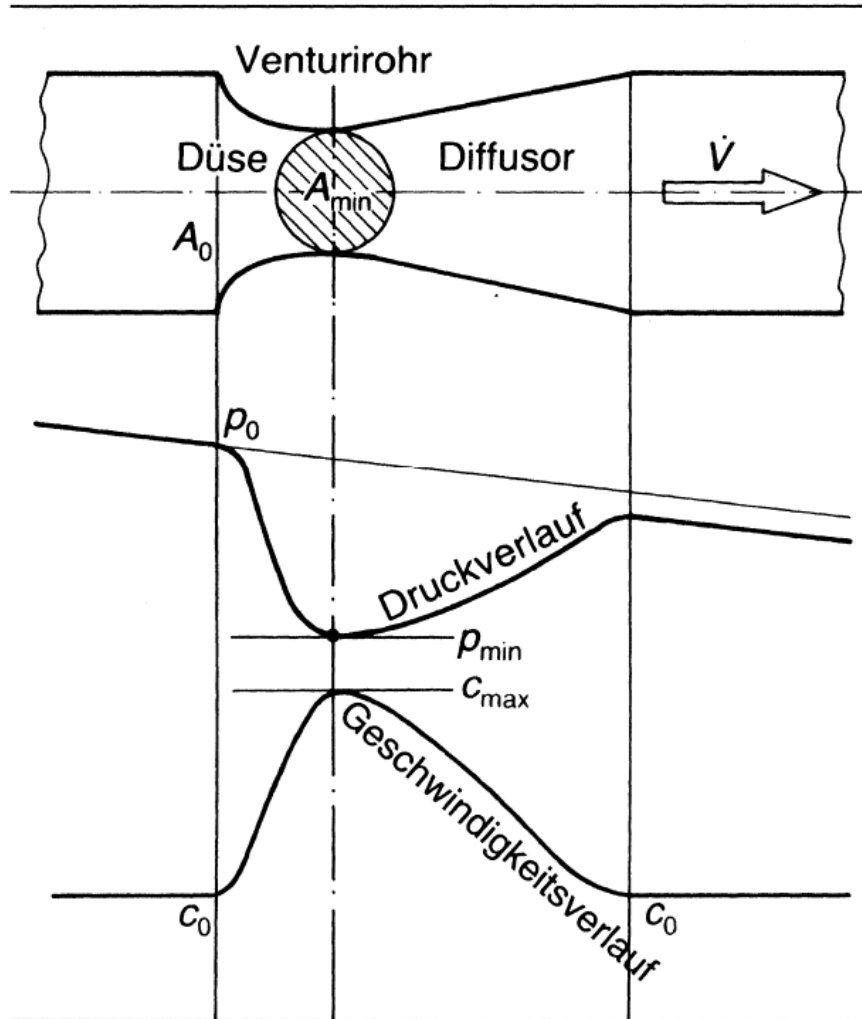
1. Energieerhaltungssatz in der Form von Bernoulli:

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

2. Abhängigkeit des Dampfdruckes (Sättigungsdruck) von der Temperatur

# Grundlagen der Kavitation

## Innenströmung

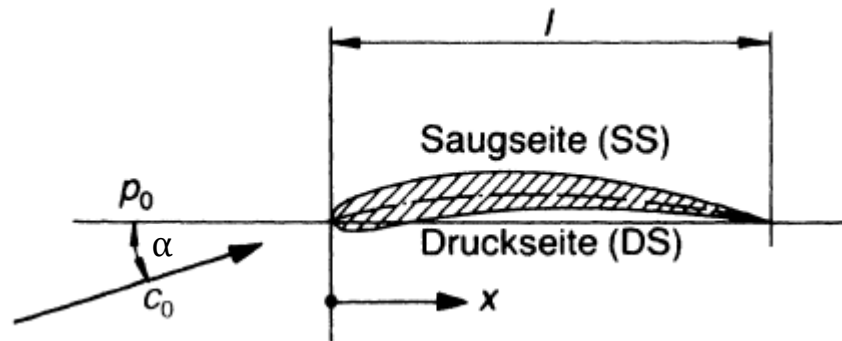


Absenkung des statischen Druckes durch eine Geschwindigkeitserhöhung für eine Innenströmung am Beispiel der Durchströmung eines Venturirohres

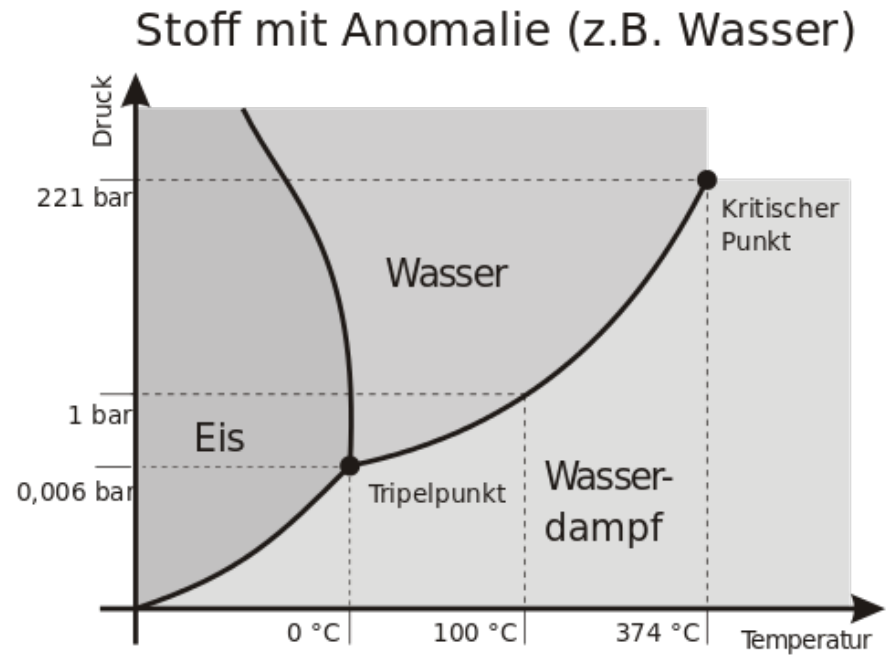
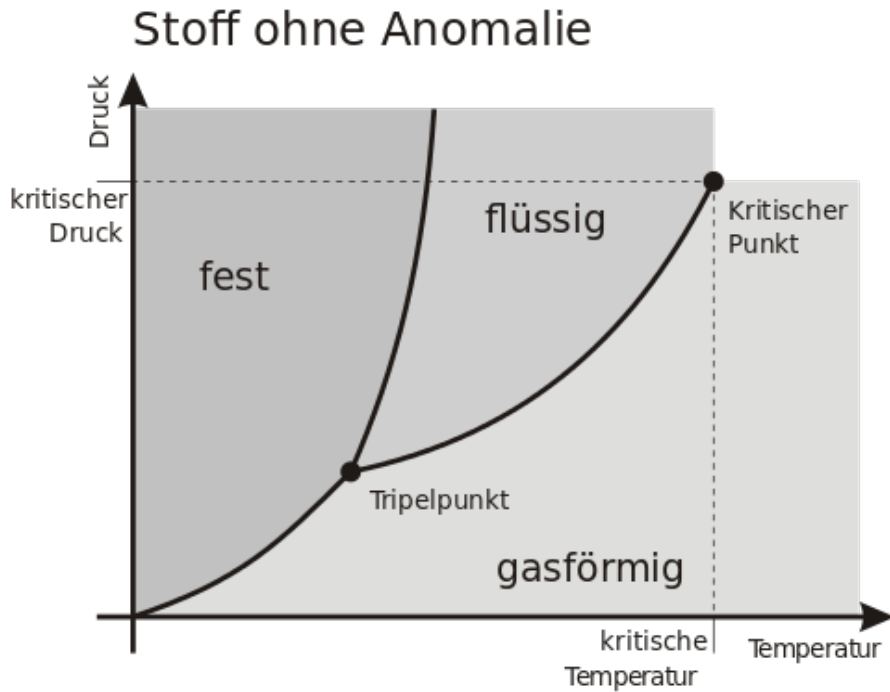
[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

# Grundlagen der Kavitation

Absenkung des statischen Druckes durch eine Geschwindigkeitserhöhung für eine Außenströmung am Beispiel der Tragflügelumströmung



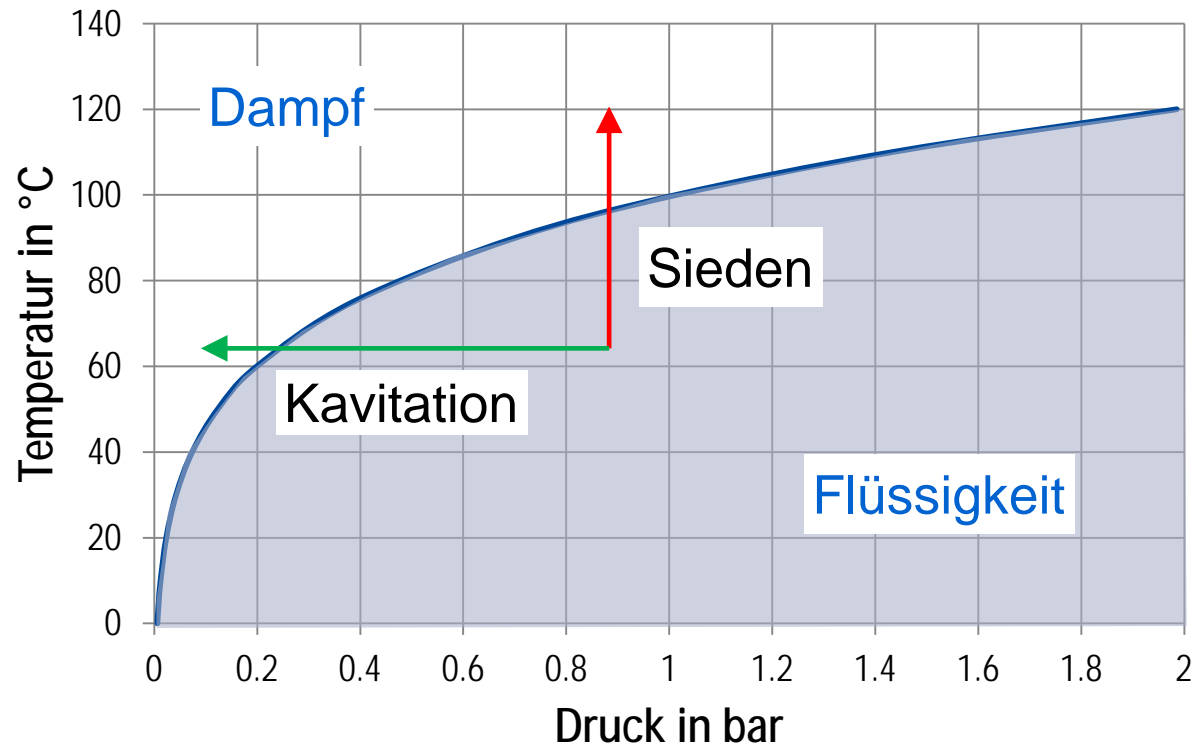
# Grundlagen der Kavitation



*Phasendiagramme*

[wikipedia]

## Sättigungsdruckkurve von Wasser



# Grundlagen der Kavitation

## **schädliche Auswirkungen der Kavitation:**

- Verengung der effektiven Strömungsquerschnitte durch die Dampfblasen
  - ↳ Förderhöhenabnahme
  - ↳ Wirkungsgradabfall
- Geräusche und Schwingungen
- Materialzerstörung

Kavitation sollte deshalb möglichst vermieden werden!

# Grundlagen der Kavitation

In realen Strömungen ist die Ausbildung der **Kavitation ein sehr komplexer Vorgang**. Folgende Einflüsse haben einen Einfluss auf den Kavitationsablauf, insbesondere auf den Kavitationsbeginn:

Einflüsse auf den kleinsten Druck  $p_{\min}$ :

- Reibungsverluste
- Grenzschichtströmungen
- Strömungsablösung
- Größe und Geometrie des umströmten Körpers
- Wirbel
- Turbulenz
- Wandrauigkeit

# Grundlagen der Kavitation

## Einflüsse der Flüssigkeitseigenschaften:

- Wasserqualität
  - Gehalt an gelöstem Gas
  - Gehalt an ungelöstem Gas und weiterer Kavitationskeime
- Oberflächenspannung
- Wärmeleitung
- Schallgeschwindigkeit

## 6.2 Blasendynamik

Wie kann der Zerfall der Dampfblasen beschrieben werden?

Wie führt der Blasenzerfall zur Materialzerstörung?

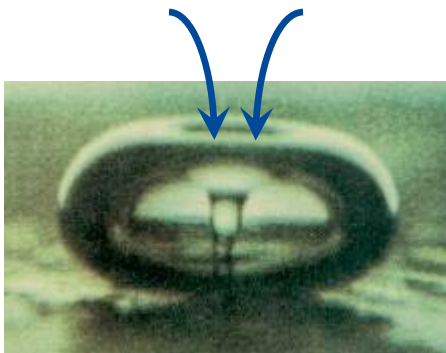
# Blasendynamik

- Transport der mit Kavitationskeimen beladenen Flüssigkeit in Bereiche niedrigen Druckes
- Nach Unterschreitung des kritischen Druckes schnelles Anwachsen der Dampfblasen
- maximale Blasengröße von Dauer und Schnelligkeit der Wachstumsphase abhängig
- Blasenwachstum ist abhängig von:
  - Trägheit der zu verdrängenden Flüssigkeit
  - Wärmetransport
  - Oberflächenspannung
- Bei Erreichen eines Gebietes mit überkritischem Druck kondensiert der Dampf mit Überschallgeschwindigkeit → schlagartiger Kollaps der Blase (Implosion)

# Blasendynamik

## Form des Blasenzusammenbruches abhängig vom Ort:

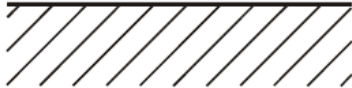
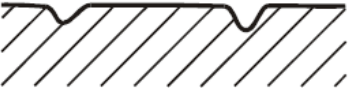


- kugelsymmetrischer Zusammenfall entfernt von einer Wand
  - Wandabstand wesentlich größer als der maximale Blasendurchmesser
  - Ausbildung von sehr hohen Druckspitzen (Druckwellen)
- asymmetrischer Zusammenfall in Wandnähe
  - Ausbildung eines mit hoher Geschwindigkeit auf die Wand treffenden Flüssigkeitsstrahls (Mikrojet)
  - schlagartige Druckbelastung auf die Wand (Drücke von 1000 bis 10000 bar)



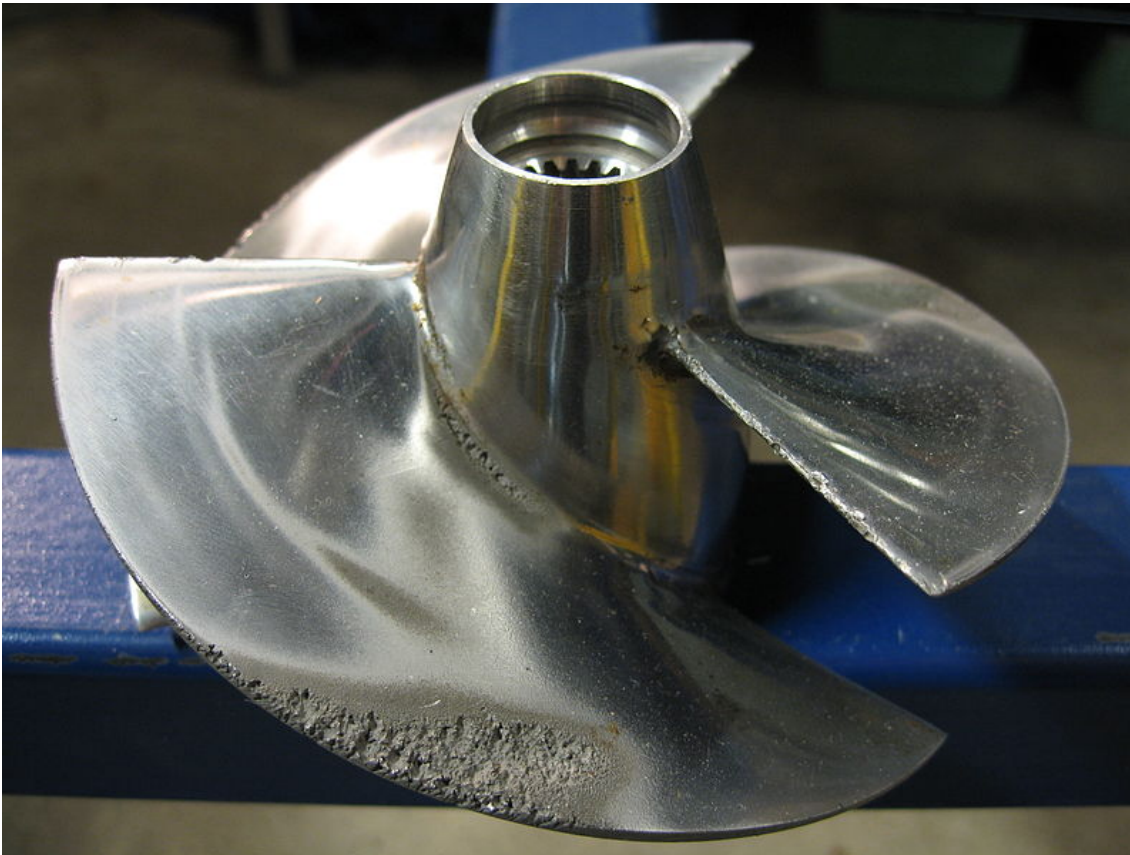
Tafel 20

Tafel 21

## Materialschädigung

Phase	Profil	Vorgang	Meßmethode
1		Lockerung von Gefüge und Schutzschichten, Ermüdung	Messung und Analyse von Druckimpulsen
2		Bildung von „pits“ (= plast. Verformung)	Auswertung von „pits“ pro Zeit und Fläche
3		Überlappung von „pits“ (auch Verstärkungseffekt)	- Vermessung des Oberflächenprofils - REM
4		Bruchvorgänge, Volumenverlust	Bestimmung des Gewichtsverlustes durch Wägung

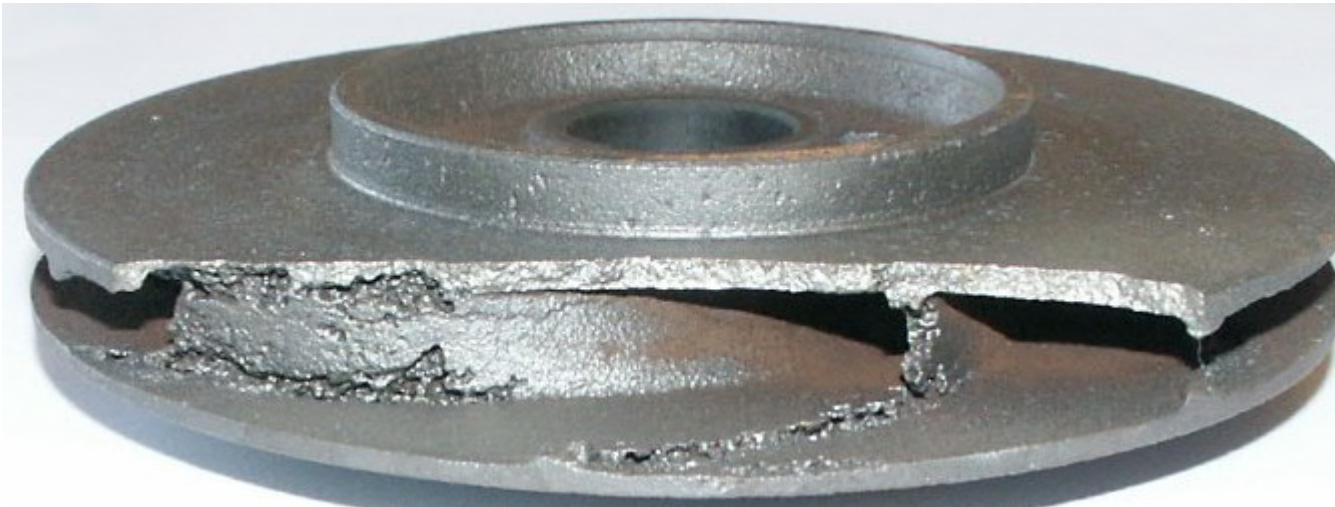
## Materialschädigung



Kavitationserosion  
an einem Propeller

[wikipedia; Erik Axdah]

## Materialschädigung



Kavitationserosion an einem Pumpenlaufrad

[wikipedia; Klaus Bärbel]

## 6.3 spezifische Halteenergie

Wie wird das Eintreten von Kavitation bei einer Pumpe oder Wasserturbine bestimmt?

## spezifische Halteenergie

### Definition:

Summe aus spezifischer Druck- und Geschwindigkeitsenergie, vermindert um die spezifische Verdampfungsenergie der Flüssigkeit, bezogen auf den

- Eintrittsquerschnitt einer Pumpe
- Austrittsquerschnitt einer Wasserturbine

Unterscheidung in

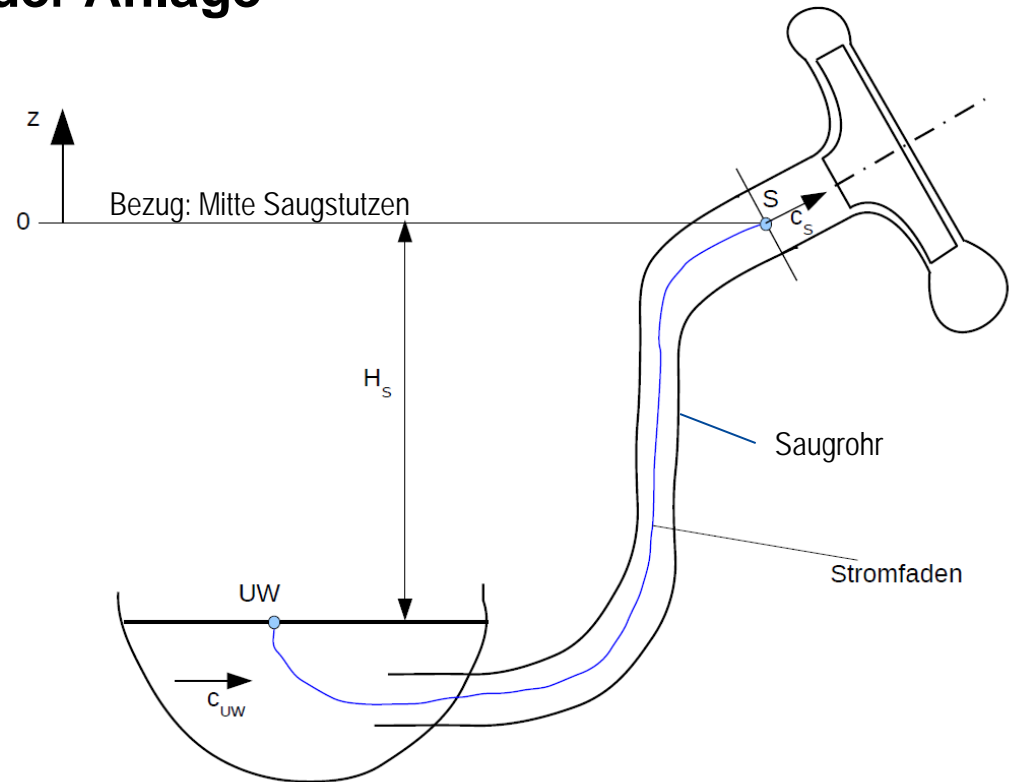
- von der Anlage vorgegebene spez. Halteenergie  $Y_{HA}$
- spez. Halteenergie der Maschine  $Y_H$

kavitationsfreier Betrieb, wenn gilt  $Y_{HA} > Y_H$

# spezifische Halteenergie

## Spezifische Halteenergie der Anlage

$$Y_{HA} = \frac{p_S - p_D}{\rho} + \frac{c_S^2}{2}$$



$p_S$  ... Absolutdruck am Pumpensaugstutzen

$p_D$  ... Dampfdruck der Förderflüssigkeit

$c_S$  ... Strömungsgeschwindigkeit am Saugstutzen

Tafel 22

## spezifische Halteenergie

### Spezifische Halteenergie der Anlage für eine Pumpenanlage

mit Bernoulli folgt:

$$Y_{HA} = \frac{p_S - p_D}{\rho} + \frac{c_S^2}{2} = \frac{p_{UW} - p_D}{\rho} + \frac{c_{UW}^2}{2} - g \cdot H_S - \frac{\Delta p_V}{\rho}$$

$p_{UW}$  ... Druck auf unteren Wasserspiegel

$H_S$  ... geodätische Saughöhe

$c_S$  ... Strömungsgeschw. am Saugstutzen

$\Delta p_V$  ... Druckverluste in der Saugleitung (für  
Wasserturbinen ändert sich das Vorzeichen)

## spezifische Halteenergie

### **Spezifische Halteenergie der Maschine (Pumpe, Wasserturbine)**

Um die Flüssigkeit auf maximale Geschwindigkeit in der Maschine zu beschleunigen und um die Reibung im Saugraum zu überwinden, wird Halteenergie benötigt.

Nach Pfeleiderer bezieht sich die spezifische Halteenergie von Maschinen  $Y_H$  auf die Strömungsgeschwindigkeiten:

- für Kreiselpumpen am Laufradeintritt
- für Wasserturbinen am Laufradaustritt

## spezifische Halteenergie

### Spezifische Halteenergie der Maschine (Pumpe, Wasserturbine)

- empirische Berechnung kaum möglich (abhängig von Zuströmbedingungen, Laufradgeometrie, Wasserqualität usw.)
  - ↪ experimentelle / numerische Ermittlung notwendig

Ansatz nach Pfeleiderer: 
$$Y_H = \lambda_1 \frac{w_0^2}{2} + \lambda_2 \frac{c_0^2}{2}$$

$\lambda_1$  und  $\lambda_2$  sind Erfahrungswerte und liegen bei drallfreier Zuströmung in den Bereichen

Pumpen:  $\lambda_1 \approx 0,25 \dots 0,35$ ;  $\lambda_2 \approx 1,1 \dots 1,3$

Turbinen:  $\lambda_1 \approx 0,25$ ;  $\lambda_2 \approx 0,7$

- weitere Ansätze für Pumpen von Petermann, Stepanoff, Gülich, Europump)

## spezifische Halteenergie

### Saughöhe:

Umstellung von

$$Y_{HA} = \frac{p_{UW} - p_D}{\rho} + \frac{c_{UW}^2}{2} - g \cdot H_S - \frac{\Delta p_V}{\rho}$$

nach  $H_S$  für den Grenzfall, dass  $Y_{HA} = Y_H$  ist, ergibt die maximale Saughöhe für einen kavitationsfreien Betrieb:

$$H_{S,max} \leq \frac{p_{UW} - p_D}{g \cdot \rho} + \frac{c_{UW}^2}{2g} - \frac{\Delta p_V}{g \cdot \rho} - \frac{Y_H}{g}$$

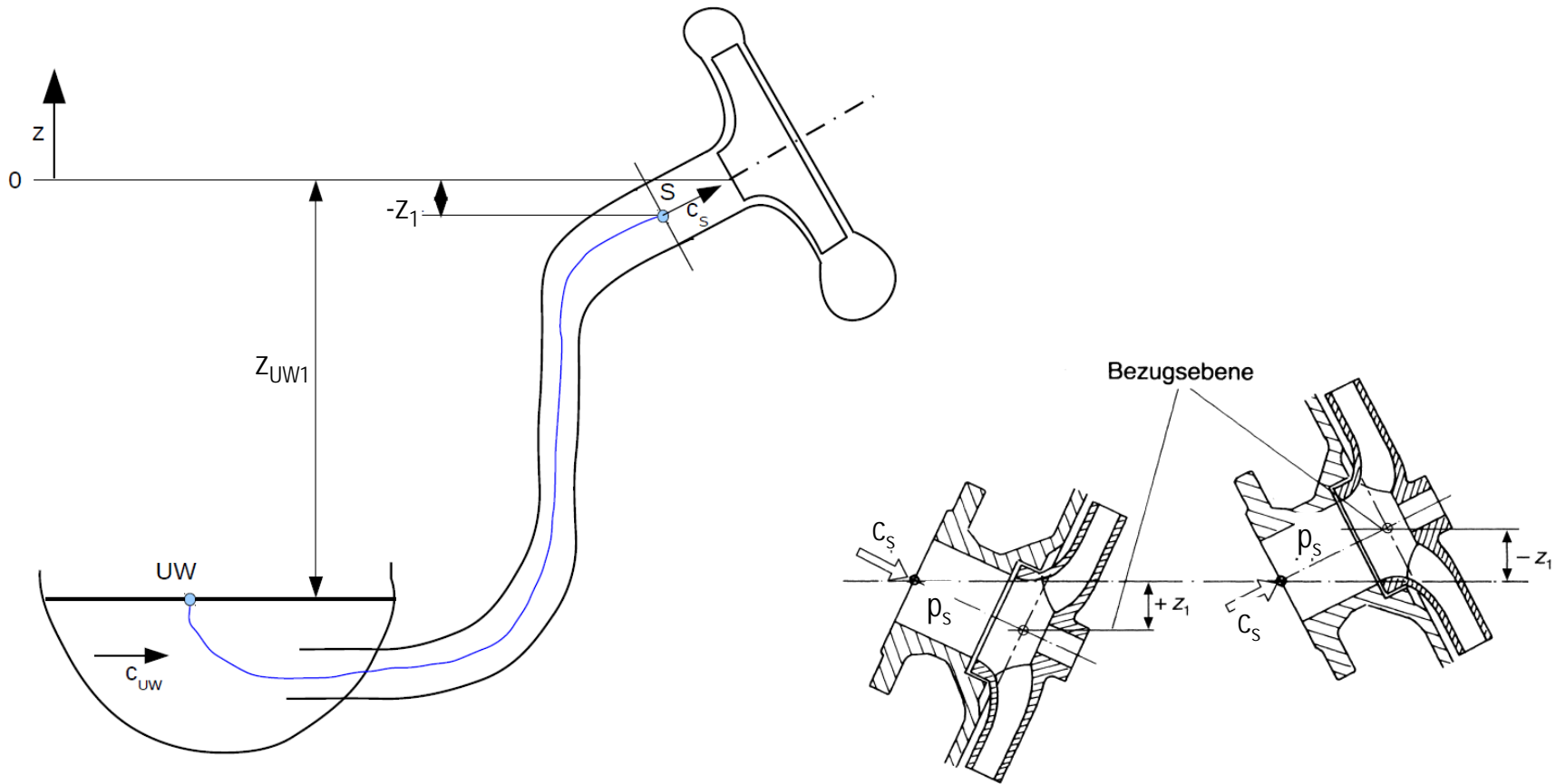
## 6.4 NPSH-Werte für Pumpen

Welche Bedeutung hat die Angabe des NPSH-Wertes für das Betriebsverhalten / Saugverhalten einer Pumpe?

## NPSH-Werte für Pumpen

- aus den USA stammender Begriff für die Netto-Energiehöhe am Pumpeneintrittsquerschnitt
- NPSH (Net Positiv Suction Head)
- Im Unterschied zur Halteenergie ist die Bezugsebene der Laufradeintritt und nicht der Saugstutzen
- $NPSH_A$  ... (Available) vorhandener Wert in der Anlage
- $NPSH_R$  ... (Required) erforderlicher Wert, den das Laufrad „benötigt“, um kavitationsfrei zu arbeiten
- $NPSH_{R3\%}$  ... 3% Abfall der Förderhöhe
- $NPSH_i$  ... visueller Kavitationsbeginn
- $NPSH_{vk}$  ... Vollkavitation im Laufrad

# NPSH-Werte für Pumpen



$$NPSH_A = \frac{p_{UW} - p_D}{g\rho} + \frac{c_{UW}^2}{2g} - z_{UW1} - \frac{\Delta p_V}{g\rho} = \frac{Y_{HA}}{g} \pm z_1$$

# NPSH-Werte für Pumpen

- Der  $NPSH_R$ -Wert der Pumpe ist abhängig von:
    - Druckabsenkung im Laufradsaugmund
      - Laufradgeometrie
      - Förderstrom
      - Drehzahl
    - Gasgehalt
    - Viskosität
    - thermodynamische Eigenschaften
- } der Flüssigkeit

# NPSH-Werte für Pumpen

- Somit lassen sich zur Bestimmung des  $NPSH_R$ -Wertes keine allgemeingültigen Formeln ableiten.
  - ↳ Der  $NPSH_R$ -Wert der Maschine wird experimentell ermittelt.
- Soll die in der Pumpe auftretende Kavitation das zulässige Maß nicht überschreiten, muss analog zur Halteenergie gelten:

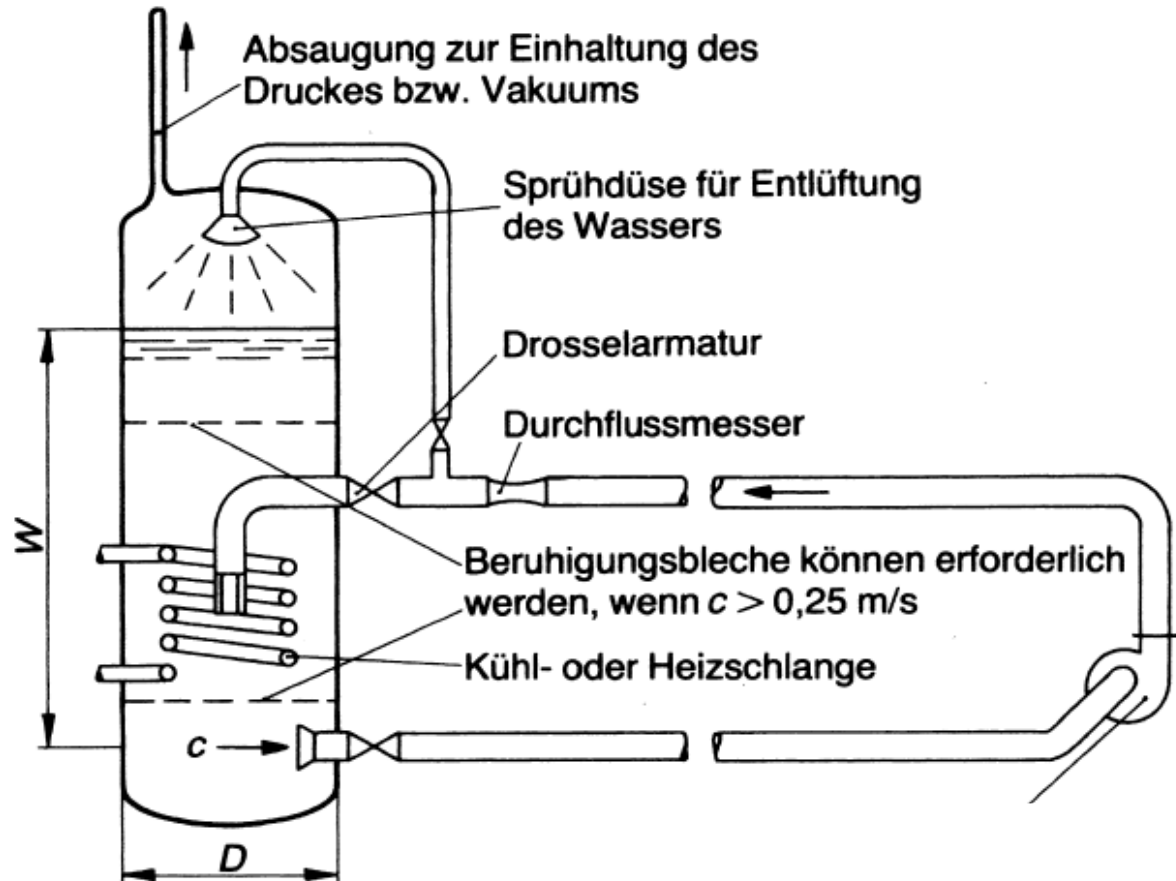
$$NPSH_A > NPSH_R$$

- ↳ Entwicklungsziel:  $NPSH_R$  möglichst klein

# NPSH-Werte für Pumpen

## Messung des $NPSH_R$ -Wertes

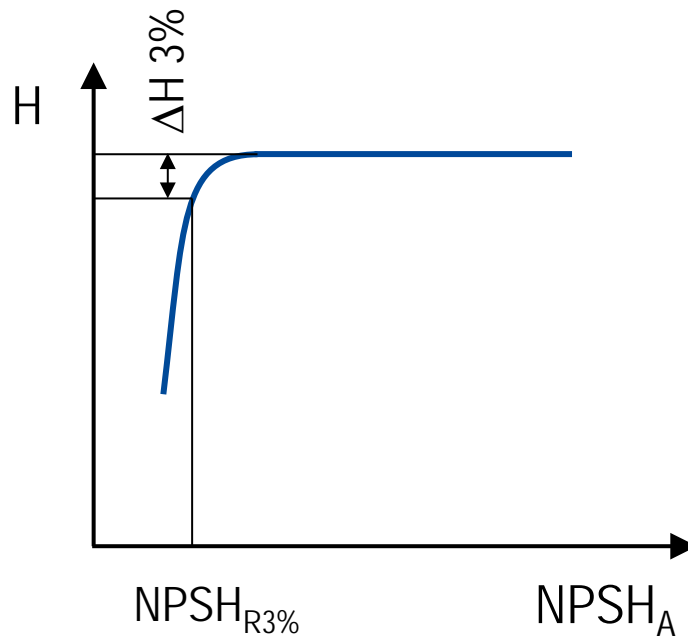
- Variation des Systemdruckes durch Luftabsaugung
- Variation der Flüssigkeitstemperatur  $T$  und damit des Dampfdruckes



[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

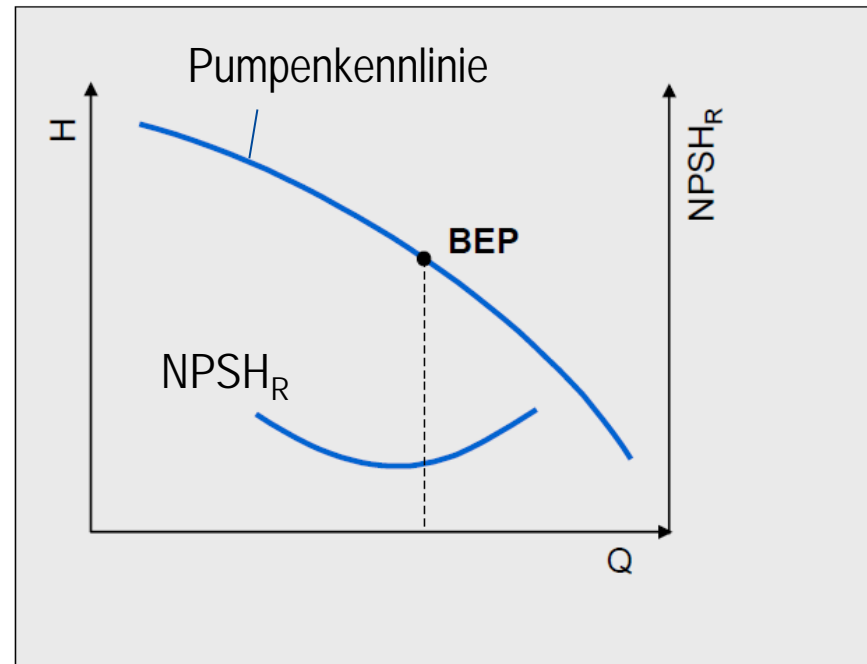
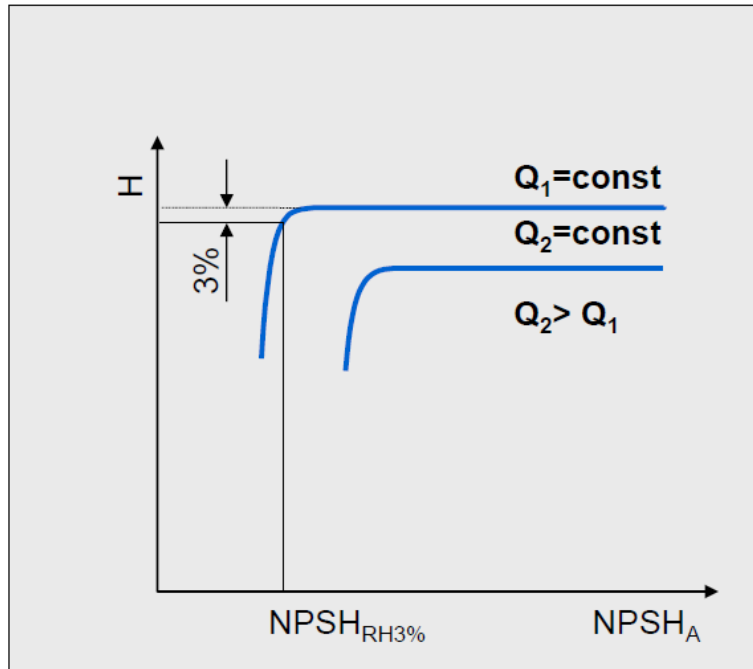
# NPSH-Werte für Pumpen

Messung des  $\text{NPSH}_R$ -Wertes unter Berücksichtigung des 3%-Förderhöhenabfall-Kriteriums



# NPSH-Werte für Pumpen

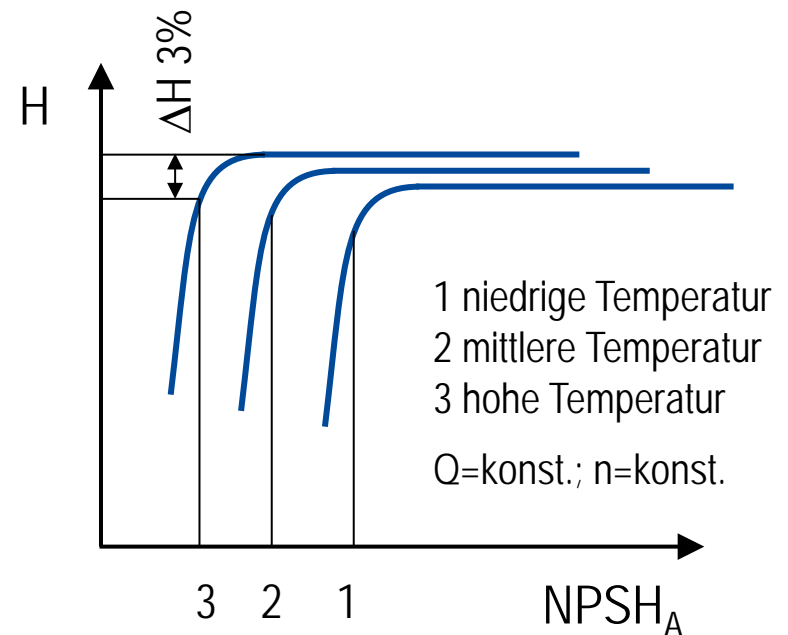
Abhängigkeit des  $NPSH_R$ -Wertes vom Volumenstrom (links) und  $NPSH_R$ -Kennlinie einer Kreiselpumpe (rechts)



# NPSH-Werte für Pumpen

## Abhängigkeit des $NPSH_R$ -Wertes von der Temperatur

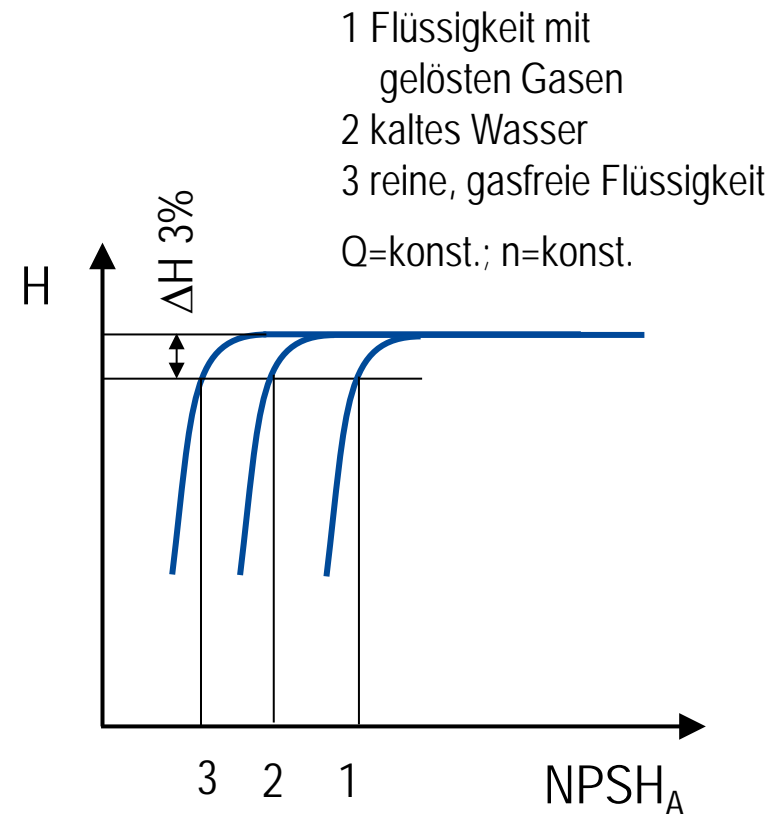
- niedrige Temperaturen  $\rightarrow$  bereits kleine Flüssigkeitsmengen bilden große Dampfvolumen
  - $\hookrightarrow$  Verstopfung der Strömungsräume
- höhere Temperaturen  $\rightarrow$  kleinere Dampfvolumen  $\rightarrow$  geringere Versperrung



# NPSH-Werte für Pumpen

## Abhängigkeit des $NPSH_R$ -Wertes vom Gasgehalt

- gelöste Gase (insbesondere Luft) bilden Verdampfungskeime



# NPSH-Werte für Pumpen

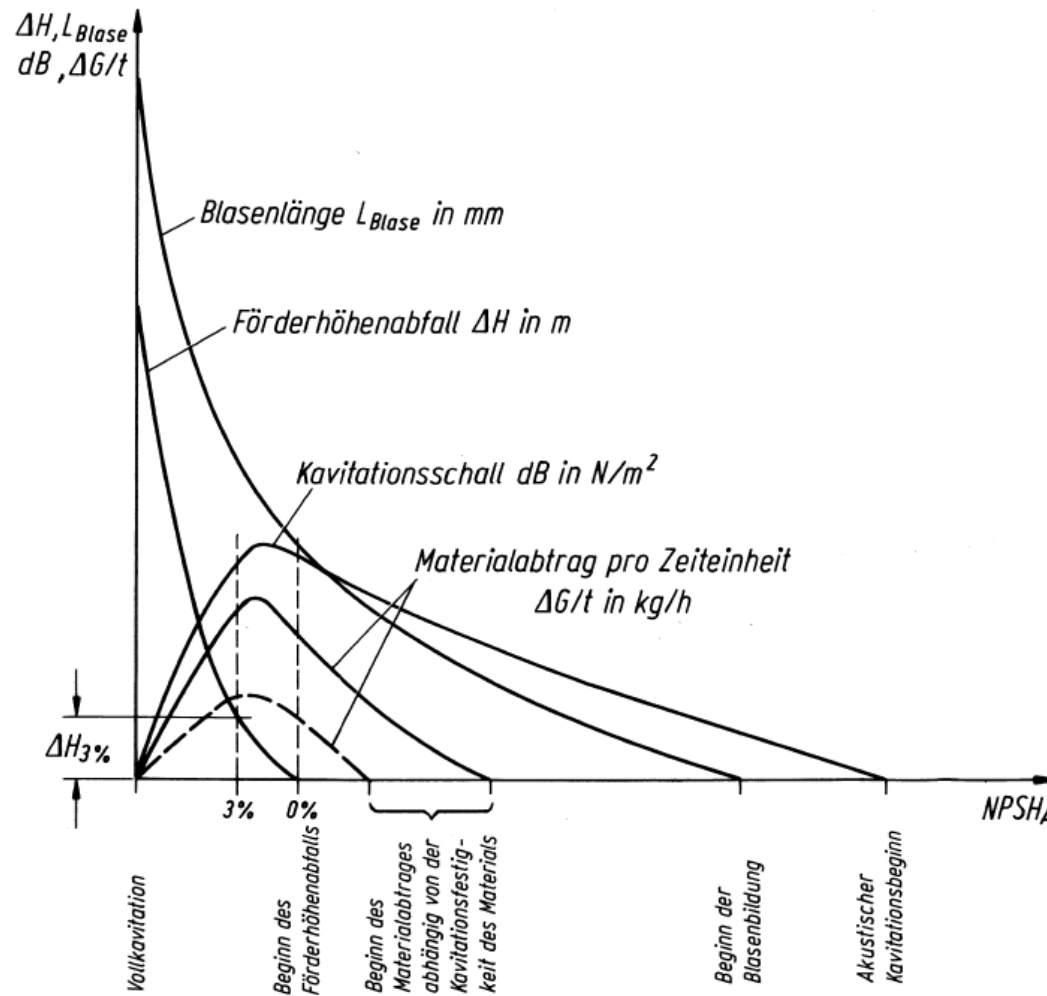


Abb. 3.5c. Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von  $NPSH_A$  bei konstanter Drehzahl und konstantem Förderstrom (nach Florjancic, D., Gülich, J. und Wesche, W.)

[Pfleiderer, Petermann: Strömungsmaschinen, 1991]

# NPSH-Werte für Pumpen

## Saughöhe:

Umstellung von

$$NPSH_A = \frac{p_{UW} - p_D}{g\rho} + \frac{c_{UW}^2}{2g} - z_{UW1} - \frac{\Delta p_V}{g\rho}$$

nach  $z_{UW1}$  für den Grenzfall, dass  $NPSH_A = NPSH_R$  ist, ergibt die maximale Saughöhe für einen kavitationsfreien Betrieb:

$$H_{S,max} = z_{UW1} \leq \frac{p_{UW} - p_D}{g \cdot \rho} + \frac{c_{UW}^2}{2g} - \frac{\Delta p_V}{g \cdot \rho} - NPSH_R$$

## 6.5 Kennzahlen der Kavitation

Kann das Kavitationsverhalten in der  
Maschinenentwurfsphase abgeschätzt werden?

# Kennzahlen der Kavitation

## Kavitationszahl $\sigma$

$$\sigma = \frac{p - p_D}{\frac{\rho}{2} c^2}$$

wenn  $\sigma \leq 0 \rightarrow$  Kavitation

weitere Kennzahlen sind die:

- Thoma-Zahl  $Th$
- dimensionslose Saugkennzahl  $S_q$  nach Petermann

## Kennzahlen der Kavitation

**Saugkennzahl  $S_q$**  nach Petermann:

$$S_q = n \frac{\sqrt{\dot{V}}}{Y_H^{3/4}}$$

$Y_H$  ... spezifische Halteenergie im Optimalpunkt

$\dot{V}$  ... Volumenstrom im Optimalpunkt

$n$  ... Drehzahl

für Kreiselpumpen:

- üblich:  $S_q=0,4 \dots 0,45$
- Inducer-Pumpen (zusätzliches Axialrad vor Radialrad)  $S_q=1,5 \dots 2,0$

## 6.6 Vermeidung von Kavitation

Welche technischen Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation gibt es?

Wie kann bei unvermeidbarer Kavitation die Materialschädigung verringert werden?

# Vermeidung von Kavitation

## Möglichkeiten zur Vermeidung der Kavitation

### 1) Anlage

- Erhöhung des  $\text{NPSH}_A$ 
  - Zulaufhöhe vergrößern
  - Vorpumpe – Druckerhöhung vor der Pumpe
  - Widerstände in der Saugleitung verringern (Einbauten, Rauheiten, Nennweite)
- Wasserqualität
- Einbringen von Luft in die Saugleitung zur Schalldämpfung

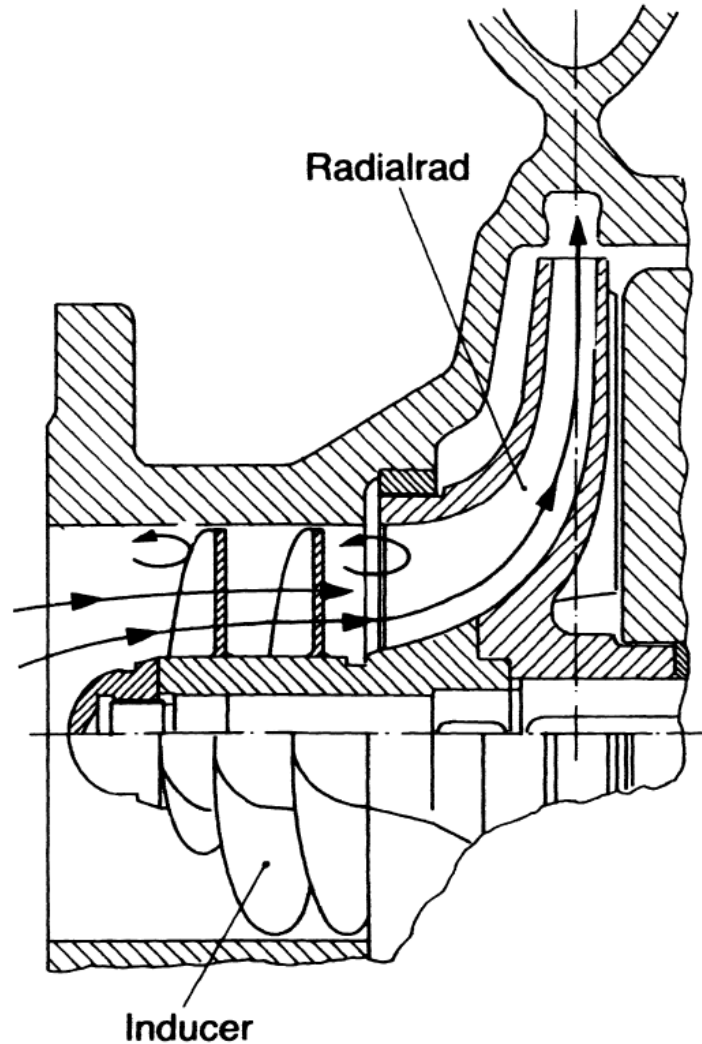
# Vermeidung von Kavitation

## Möglichkeiten zur Vermeidung der Kavitation

### 2) Maßnahmen des Pumpenherstellers

- Verringerung des  $\text{NPSH}_R$ 
  - Drehzahlanpassung
  - zweiflutiges Laufrad
  - Sauglaufrad
  - spezielle Schaufelprofile
  - Inducer
  - Optimierung des Einlaufgehäuses

# Vermeidung von Kavitation



[Bohl: Strömungsmaschinen 1, 2013]

# Vermeidung von Kavitation

## Möglichkeiten zur Verzögerung von Materialschäden

- Verwendung von kavitationsfesten Werkstoffen

Tabelle 5.9 Verschleißindex bei Kavitationserosion

Werkstoffe	Verschleißindex
Grauguss GG 25	1,0
Stahlguss GS-C 25	0,8
Messing	0,7
Bronze G-Cu Sn 10	0,5
Chromstahlguss G-X 20 Cr 14	0,2
Chromstahlguss 18-8 Cr Ni	0,2
Mehrstoffbronze G-Al Bz 10 Fe	0,1
Chromnickelstahl G-X 6 Cr Ni 189	0,05
Al-Gussbronze	0,08
NORIDUR (G-X 3 Cr Ni Mo Cu 246)	0,02
Stellit, gewalzt	0,003

[Bohl: Strömungsmaschinen 1, 2013]