

Wintersemester 2010/2011

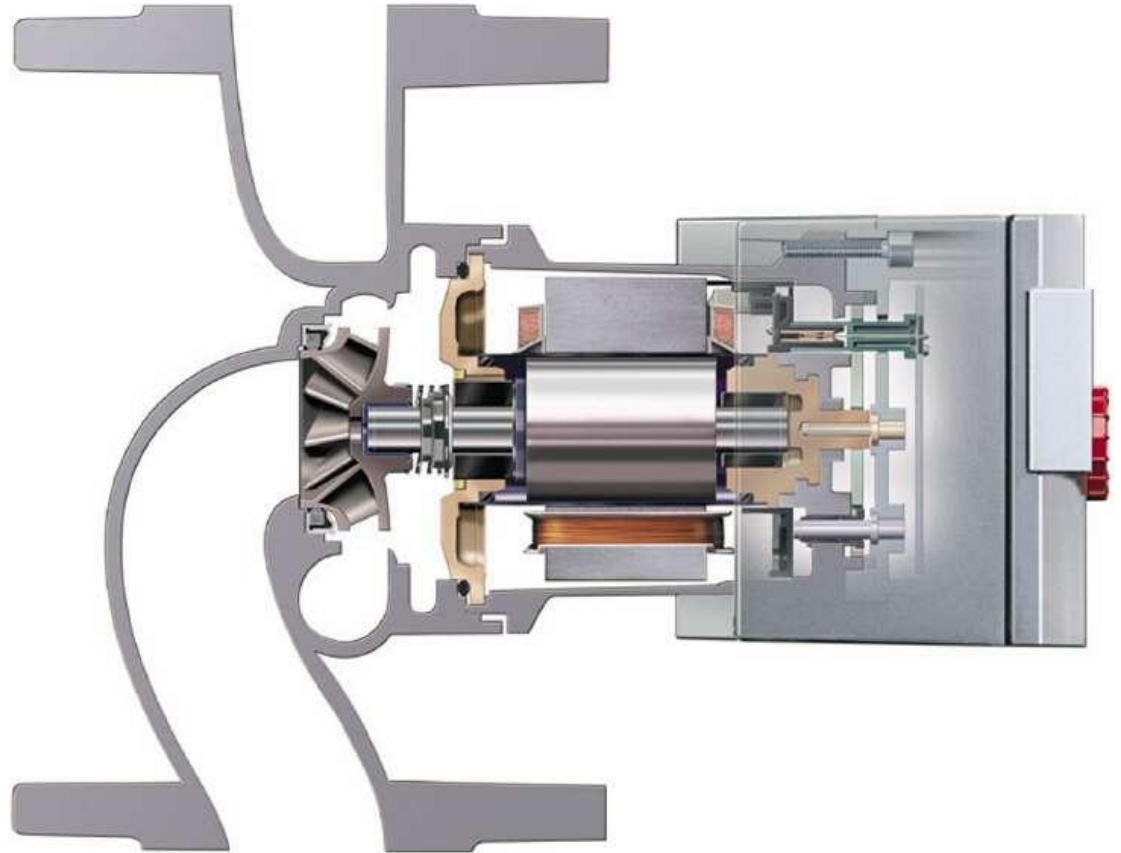
Strömungsmaschinen I

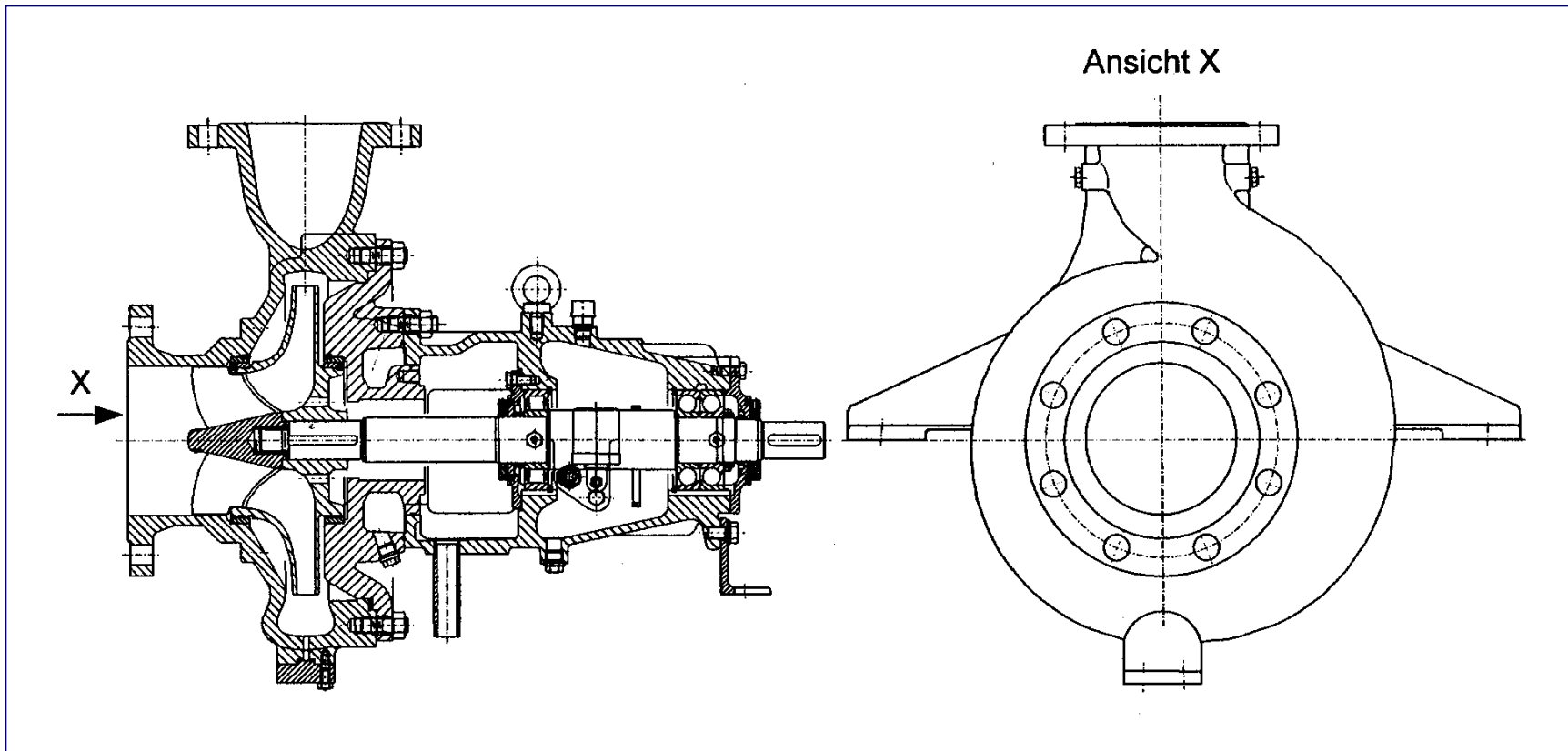
Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Herleitung und Bedeutung der Euler'schen Turbinengleichung

Pumpe mit Antrieb





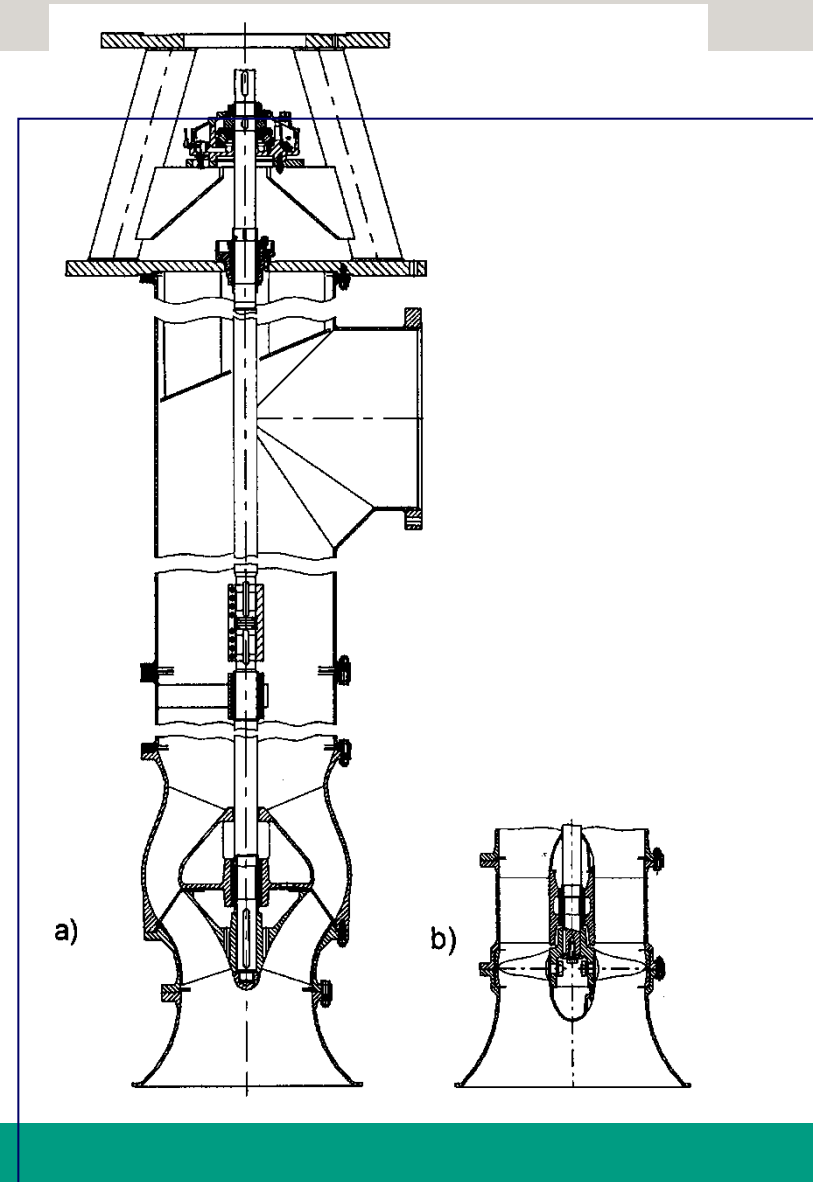
Einstufige Spiralgehäusepumpe mit Lagerträger, Sulzer Pumpen AG

Vertikalpumpen für Naßaufstellung:

a) Halbaxiale Pumpe

b) Axialpumpe

Sulzer Pumpen AG



Quelle: J.F. Gülich "Kreiselpumpen"

Aus der Vorlesung Strömungslehre

Ziel: Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Bewegungsgrößen und resultierender Kraft

Impuls $\mathbf{I} = m \cdot \mathbf{c}$

Impulssatz $\frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{F}$

Die zeitliche Änderung des Impulses einer Masse m ist gleich der resultierenden Kraft, die auf das Masseelement ausgeübt wird.

siehe Vorlesung Strömungslehre

Eine analoge Aussage gilt für den Zusammenhang von Drehimpuls und Moment

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

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 0).

Anwendung des Drehimpulssatzes

Annahmen : Strömung ist eindimensional und stationär

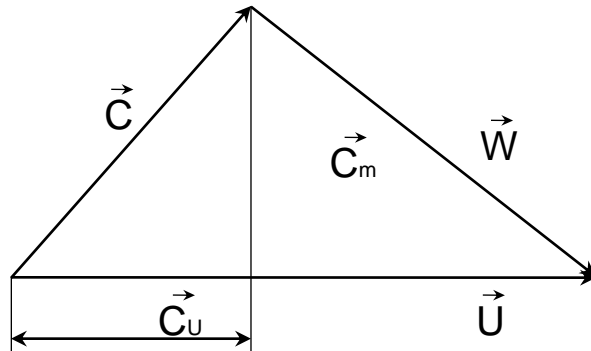
Konsequenzen aus den Annahmen:

- Ansetzen mittlerer Geschwindigkeiten
- Vernachlässigung des Drehimpulsbeitrages, der aus den turbulenten Schubspannungen in Umfangausrichtung an den Bilanzflächen 1 und 2 vorhanden ist.

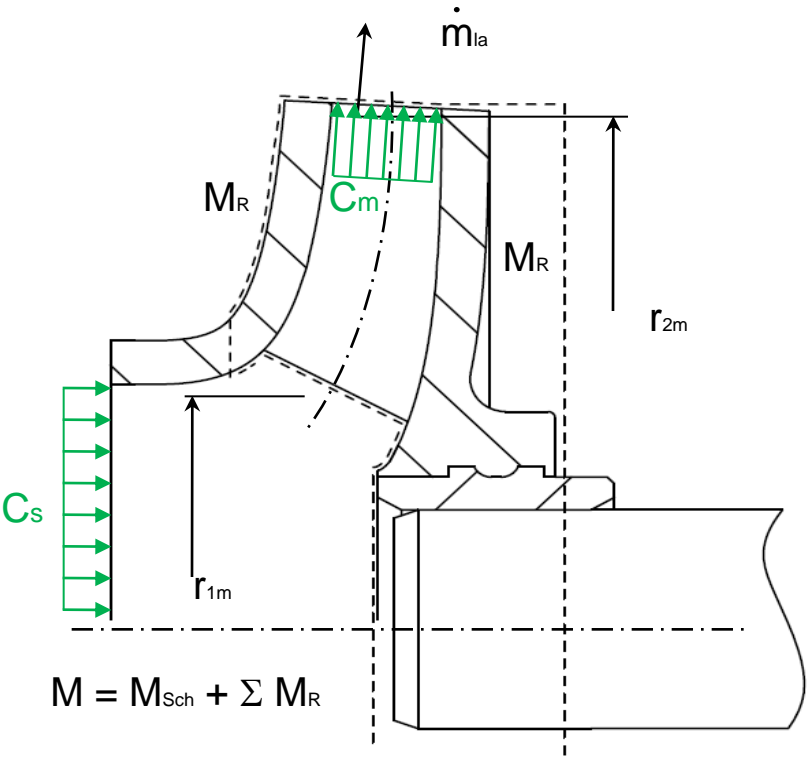
$$M_{\tau} \approx 1 \% \text{ von } M_{\text{sch}}$$

Absolut- und Relativsystem

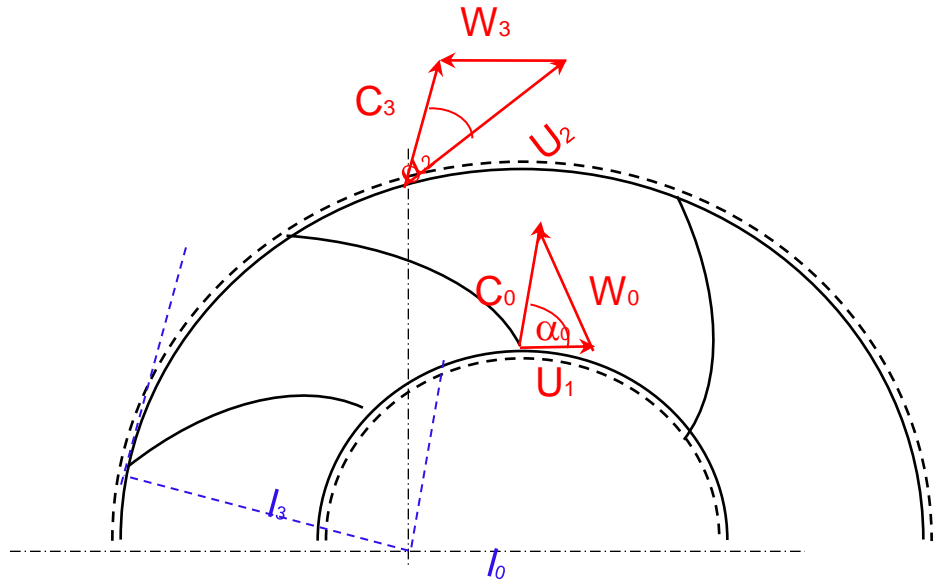
Geschwindigkeitsdreieck



Anwendung des Drehimpulssatzes



Kontrollvolumen



Bilanz des Drehimpulses

Bilanzfläche 1 :

Massestrom \dot{m}_{La} mit dem Drehimpuls $\dot{m}_{La} r_{1m} \cdot C_{ou}$

Bilanzfläche 2 :

Massestrom \dot{m}_{La} mit dem Drehimpuls $\dot{m}_{La} r_{2m} \cdot C_{3u}$

Die statischen Drücke an den Bilanzflächen und die radialen Komponenten der Geschwindigkeit erzeugen keine Kräfte in Umfangsrichtung und werden deshalb nicht berücksichtigt.

an den festen Berandungen

Moment wegen der Radseitenreibung M_R

an der Welle

übertragenes Drehmoment M

Bilanz der Momente

$$M = M_{\text{sch}} + \sum M_R$$

an der Welle übertragenes Moment

$$M_{\text{sch}} = \dot{m} (r_{2m} \mathbf{c}_{3u} - r_{1m} \mathbf{c}_{0u})$$

von den Schaufeln übertragenes Moment

mit $u = \omega r$

$$P_{\text{sch}} = M_{\text{sch}} \cdot \omega = \dot{m} (u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{0u})$$

Leistung

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

spezifische Förderarbeit

$$Y_{\text{sch}} = u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{0u}$$

**Euler'sche Turbinengleichung
(1754)**

Leonhard Euler



geb. 15. April 1707 in Basel

gest. 18. September 1783 in St.Petersburg

Professor für Mathematik an der Universität St. Petersburg
(dort Nachfolger von Daniel Bernoulli)

andere Schreibweise der Turbinengleichung

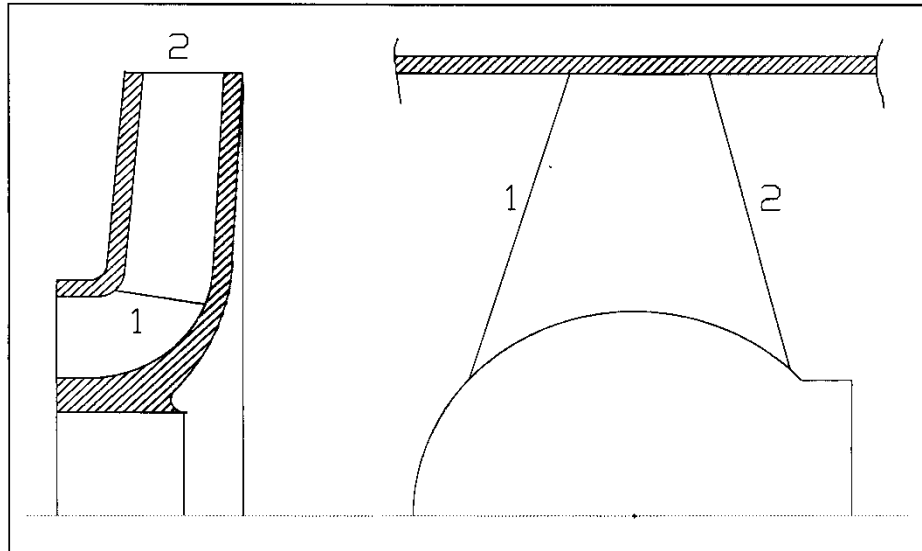
$$Y_{\text{sch}} = \mathbf{u}_{2m} \mathbf{c}_{3u} - \mathbf{u}_{1m} \mathbf{c}_{0u}$$

Anwendung der trigonometrischen Beziehungen

$$Y_{\text{sch}} = \frac{\mathbf{u}_2^2 - \mathbf{u}_1^2}{2} + \frac{\mathbf{c}_3^2 - \mathbf{c}_0^2}{2} + \frac{\mathbf{w}_0^2 - \mathbf{w}_3^2}{2}$$

$$g \times H_{th} = \left[U_2 C_{2U} - U_1 C_{1U} \right] \quad \text{Gleichung von L. Euler}$$

$$g \times H_{th} = \left[\underbrace{\frac{C_2^2 - C_1^2}{2}}_A + \underbrace{\frac{U_2^2 - U_1^2}{2}}_B + \underbrace{\frac{W_1^2 - W_2^2}{2}}_C \right]$$



Term A :
abhängig von den
Durchmessern
des Saug- und Druckstutzens

Term B :
abhängig vom Durchmesser-
unterschied zwischen Ein- und
Austrittskante

Term C :
abhängig von der Gestaltung
des
Innenraums im Laufrad

Vordrall

$$Y_{\text{sch}} = \mathbf{u}_2 \mathbf{c}_{3u} - \mathbf{u}_1 \mathbf{c}_{ou}$$

$$\mathbf{c}_{uo} \neq 0 \quad (\alpha_0 \neq 90^\circ)$$

Mitdrall $(\alpha_0 < 90^\circ)$

Förderhöhe wird reduziert

Gegendrall $(\alpha_0 > 90^\circ)$

Förderhöhe wird vergrößert

Vordrall

Gewollte Realisierung :

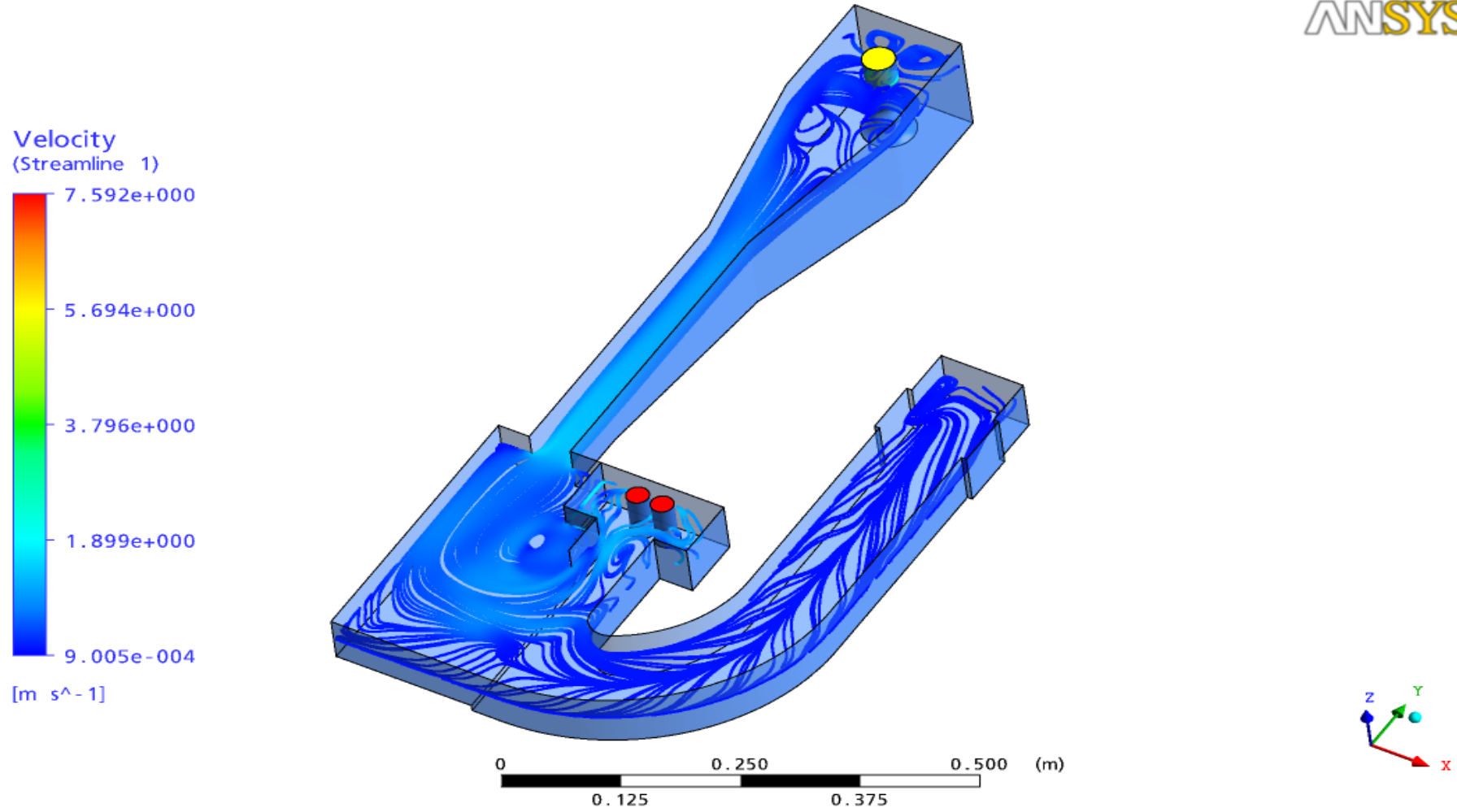
Vordrallregler mit ungeteilten
oder geteilten Schaufeln

Ungewollte Realisierung :

Ungünstige Zuströmung

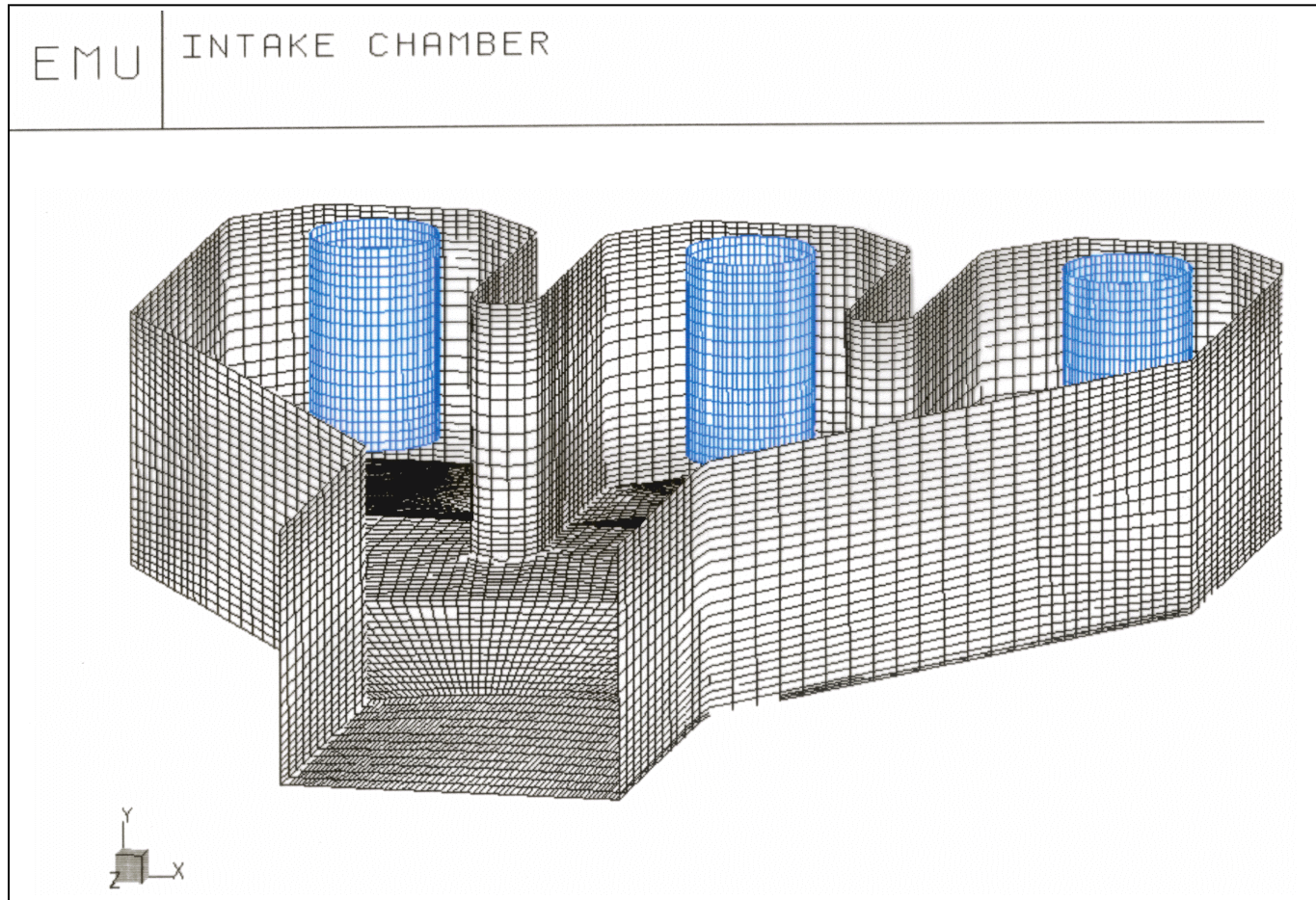
Einlaufbauwerk für Kühlwasserpumpen (Kraftwerk in Indien; $H=28\text{ m}$, $4 \times Q=35.000\text{ m}^3/\text{h}$)

ANSYS



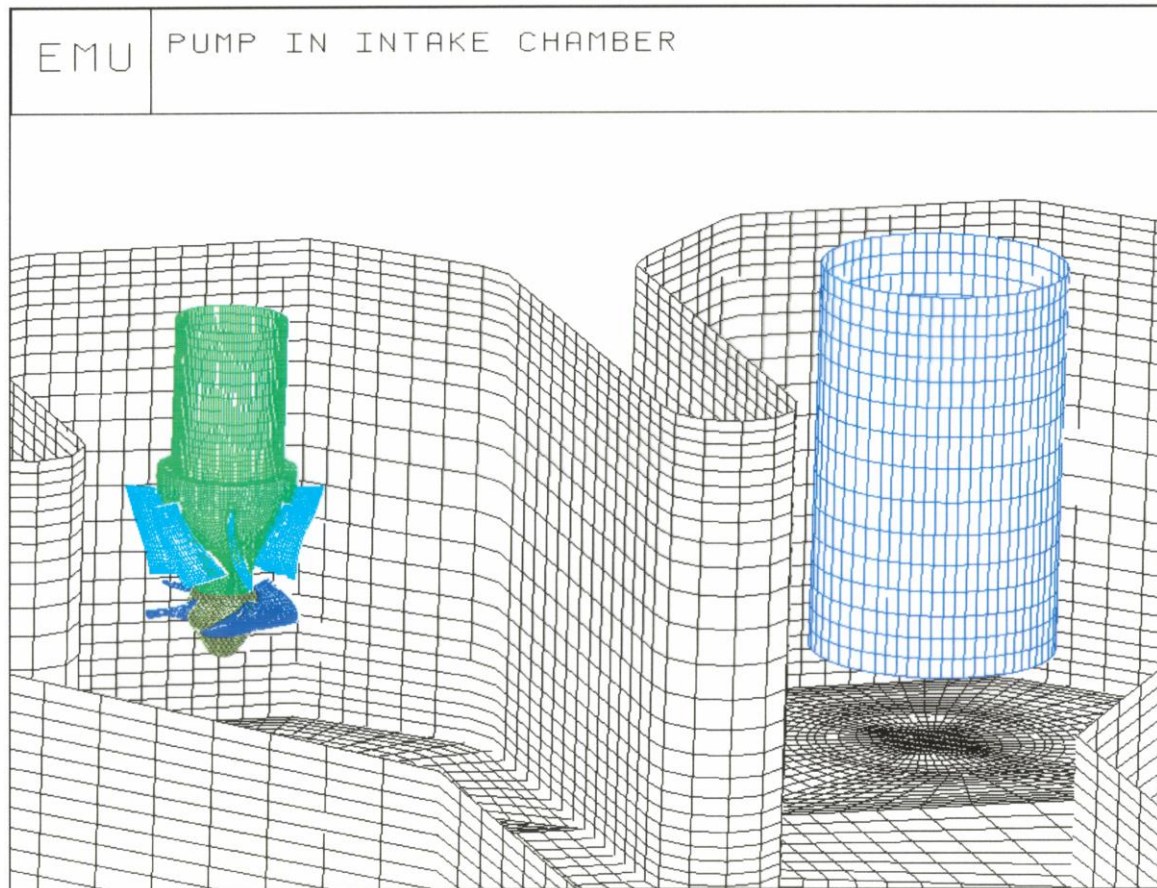
Einlaufbauwerk für Abwasserpumpen

Kläranlage in Dänemark; $H=5\text{m}$, $3 \times Q=1000 \text{ l/s}$



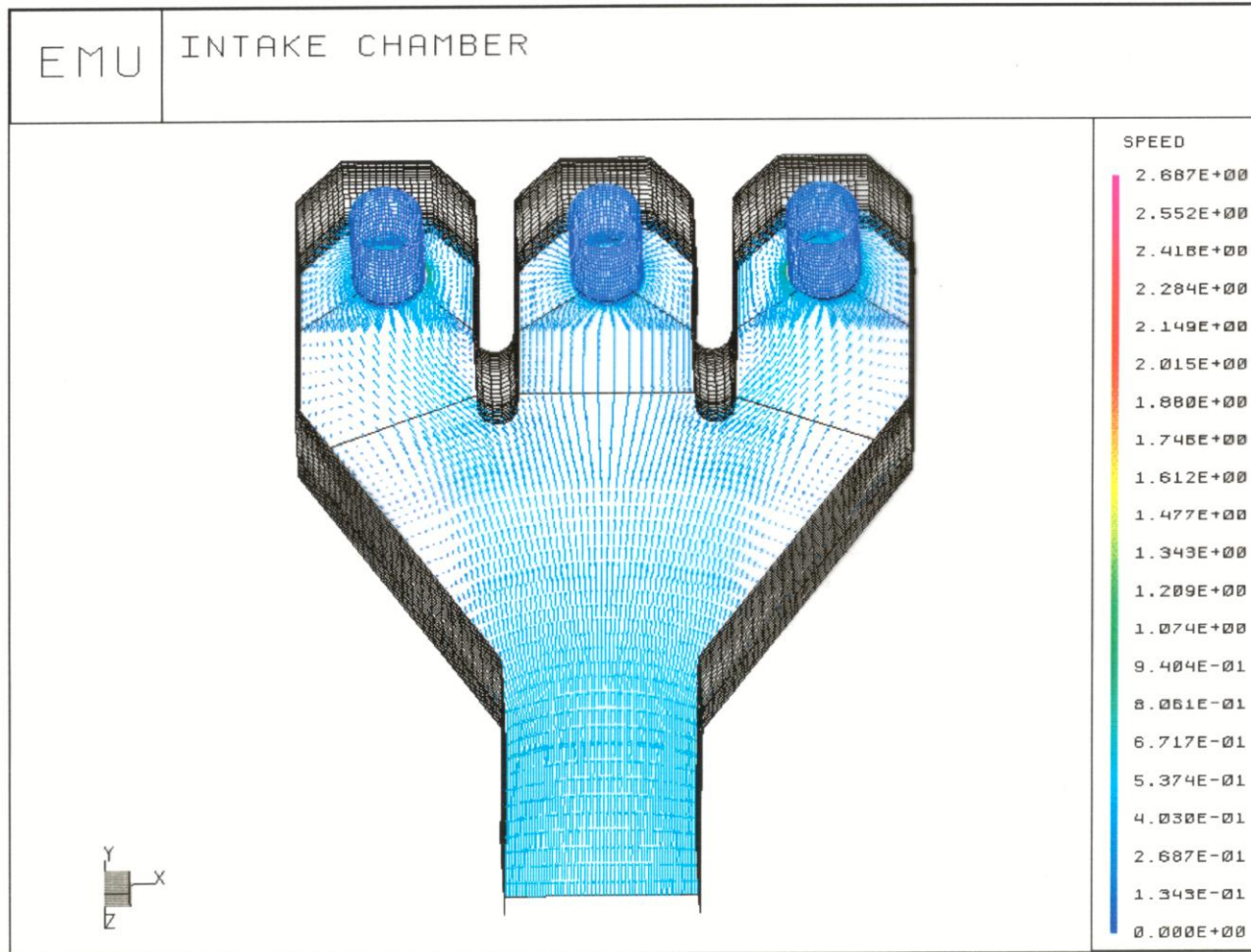
Holz, F., Wurm H.: E U ESPRIT – Projekt : „Standard Software infrastructures for SCI – based parallel systems“, Projekt Nr. 23174
(während der Bearbeitung waren beide Autoren Mitarbeiter der EMU Unterwasserpumpen GmbH)

Simultane Berechnung der Strömung im Einlaufbauwerk mit laufenden Pumpen



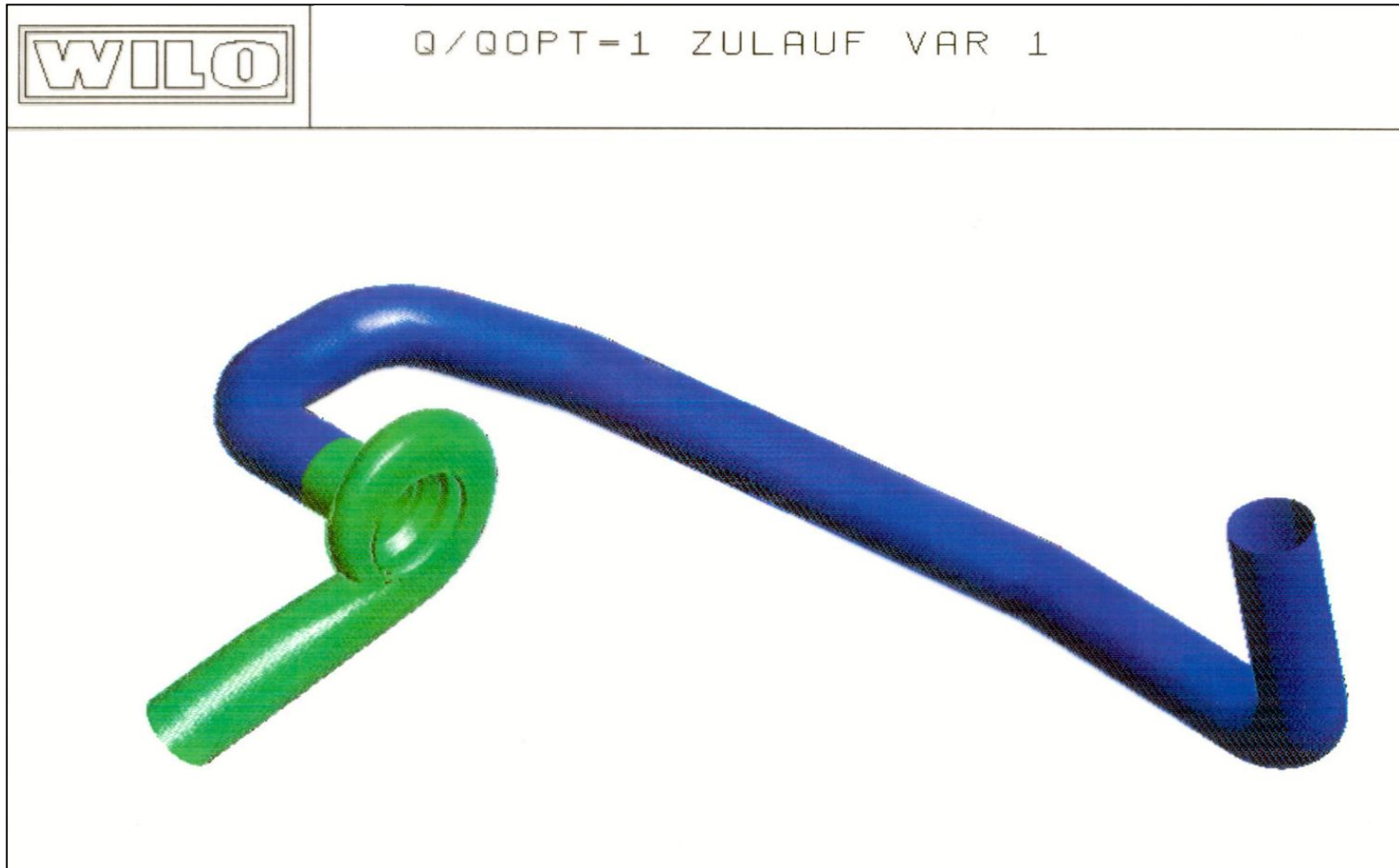
Holz, F., Wurm H.: E U ESPRIT – Projekt : „Standard Software infrastructures for SCI – based parallel systems“,
Projekt Nr. 23174 (während der Bearbeitung waren beide Autoren Mitarbeiter der EMU Unterwasserpumpen GmbH)

berechnetes Geschwindigkeitsfeld

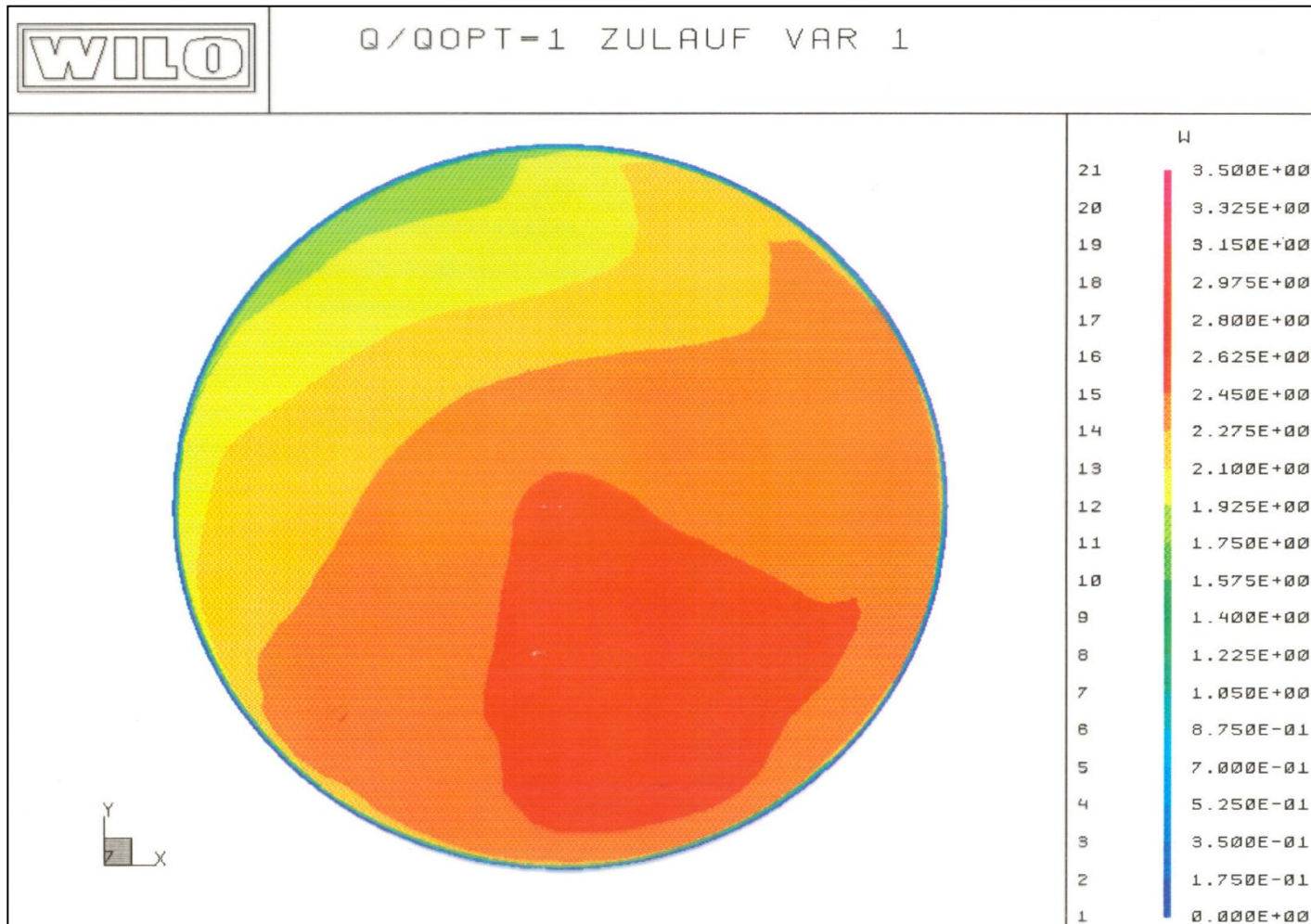


Holz, F., Wurm H.: E U ESPRIT – Projekt : „Standard Software infrastructures for SCI – based parallel systems“,
Projekt Nr. 23174 (während der Bearbeitung waren beide Autoren Mitarbeiter der EMU Unterwasserpumpen GmbH)

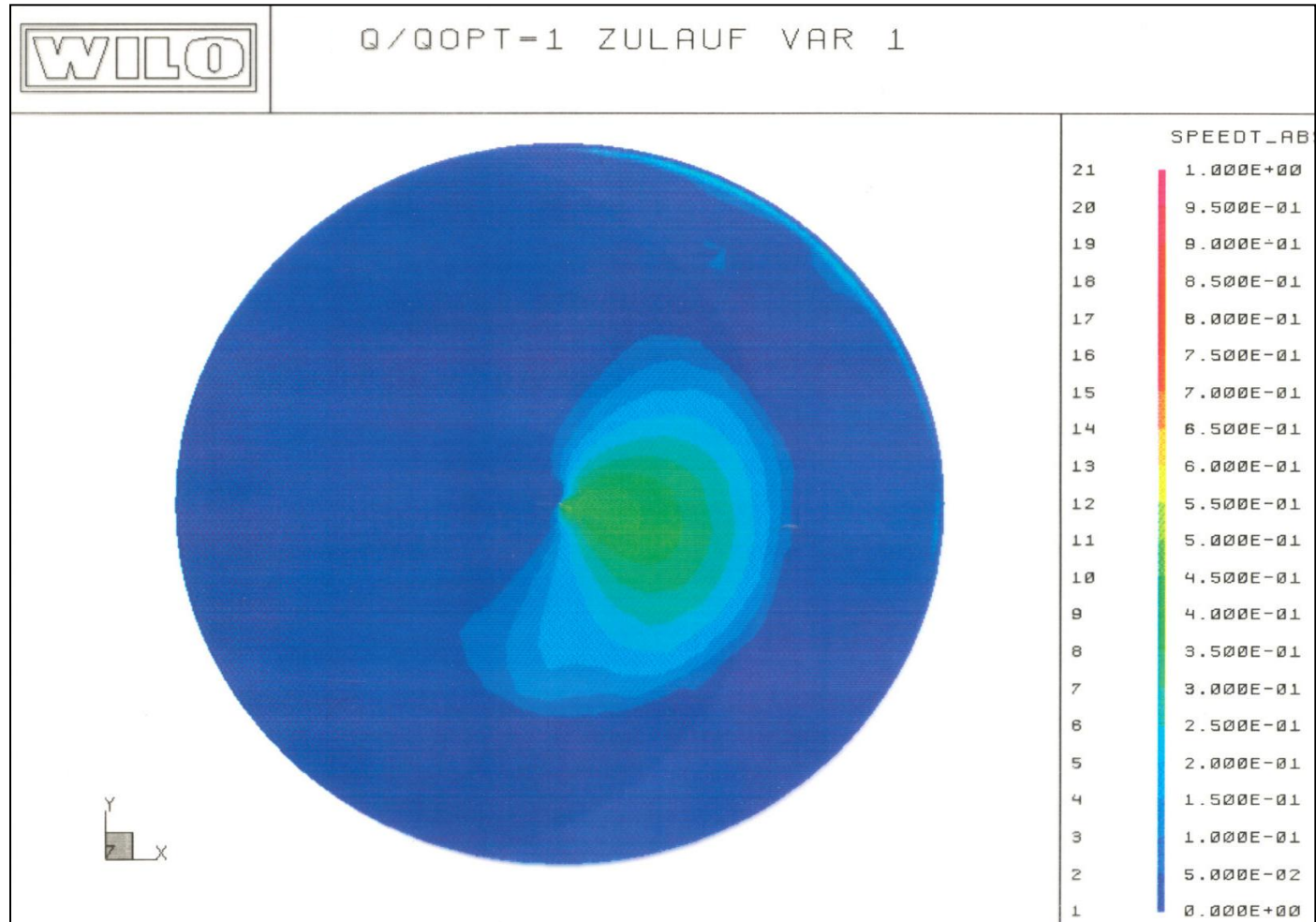
Zulauf zu einer Kühlwasserpumpe im Fahrzeug



Verteilung der Axialgeschwindigkeit vor der Pumpe



Verteilung der Umfangsgeschwindigkeit vor der Pumpe



Lauftradformen – warum?

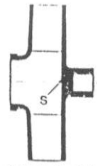


Bild 1: Radialrad mit rein radialen Schaufeln, Stau-punktrad, Stau-punkt S (Draufsicht ohne vordere Deckscheibe dargestellt)



Bild 2: Radialrad mit Schaufeln, die sich bis in den Saugmund erstrecken (Draufsicht ohne vordere Deckscheibe dargestellt)

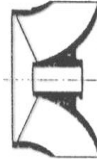
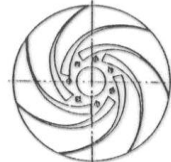


Bild 3: Halbaxialrad (Schraubenrad, Diagonalrad) (Draufsicht ohne vordere Deckscheibe dargestellt)

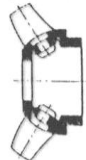
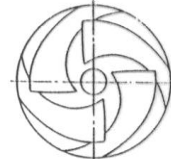


Bild 4: Halbaxialrad (halbaxialer Propeller)

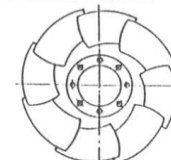


Bild 5: Axialrad (axialer Propeller)

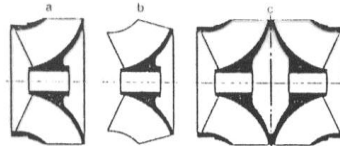
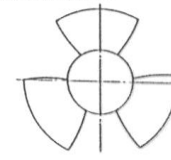


Bild 6: Zur Unterscheidung von geschlossenem und offenem, von einströmigen und zweiströmigen Lauf-rädern, gezeigt an einem Schraubenrad
a) geschlossenes Lauf-rad, einströmig; b) offenes Lauf-rad, einströmig; c) geschlossenes Lauf-rad, zweiströmig

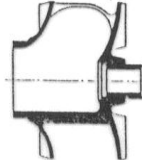


Bild 7: Geschlossenes Einschufelrad (Draufsicht ohne Deckscheibe dargestellt)

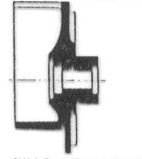
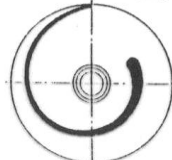


Bild 8: Offenes Einschufelrad (Draufsicht ohne Deckscheibe dargestellt)

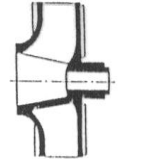
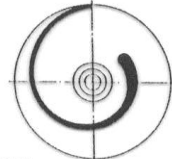


Bild 9: Geschlossenes Einkanalrad (Draufsicht ohne Deckscheibe dargestellt)

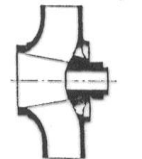


Bild 10: Geschlossenes Zweikanalrad (Draufsicht ohne Deckscheibe dargestellt)

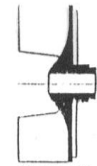
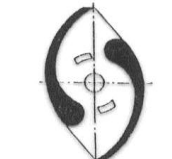


Bild 11: Offenes Zweikanalrad mit S-förmigen Schaufeln



Bild 12: Geschlossenes Dreikanalrad (Draufsicht ohne Deckscheibe dargestellt)

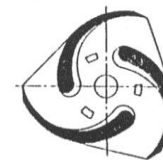


Bild 13: Offenes Dreikanalrad mit zylindrischen Schaufeln

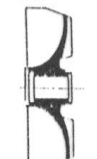


Bild 14: Freistromrad

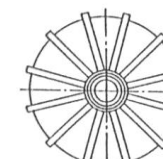
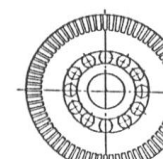
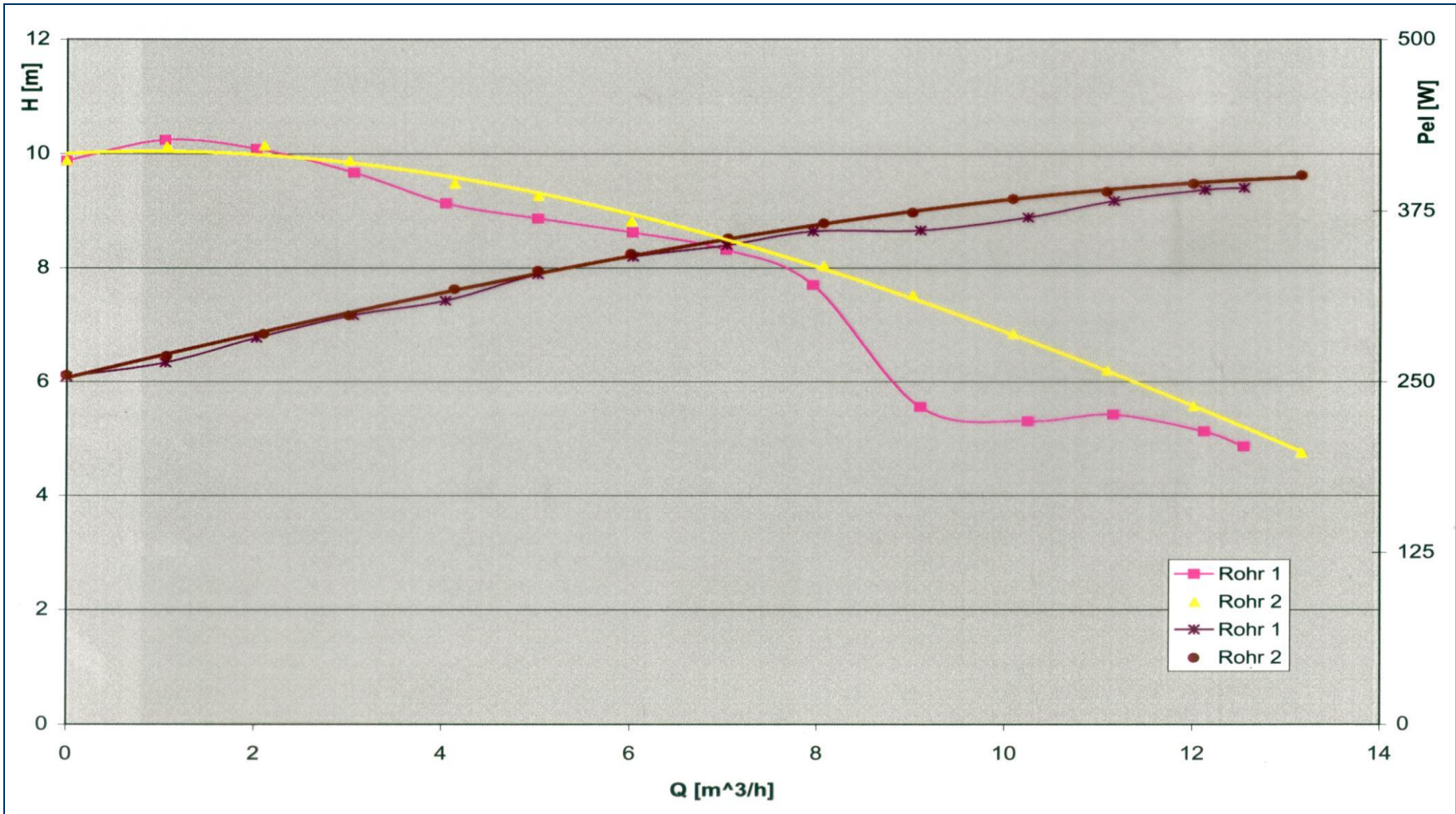
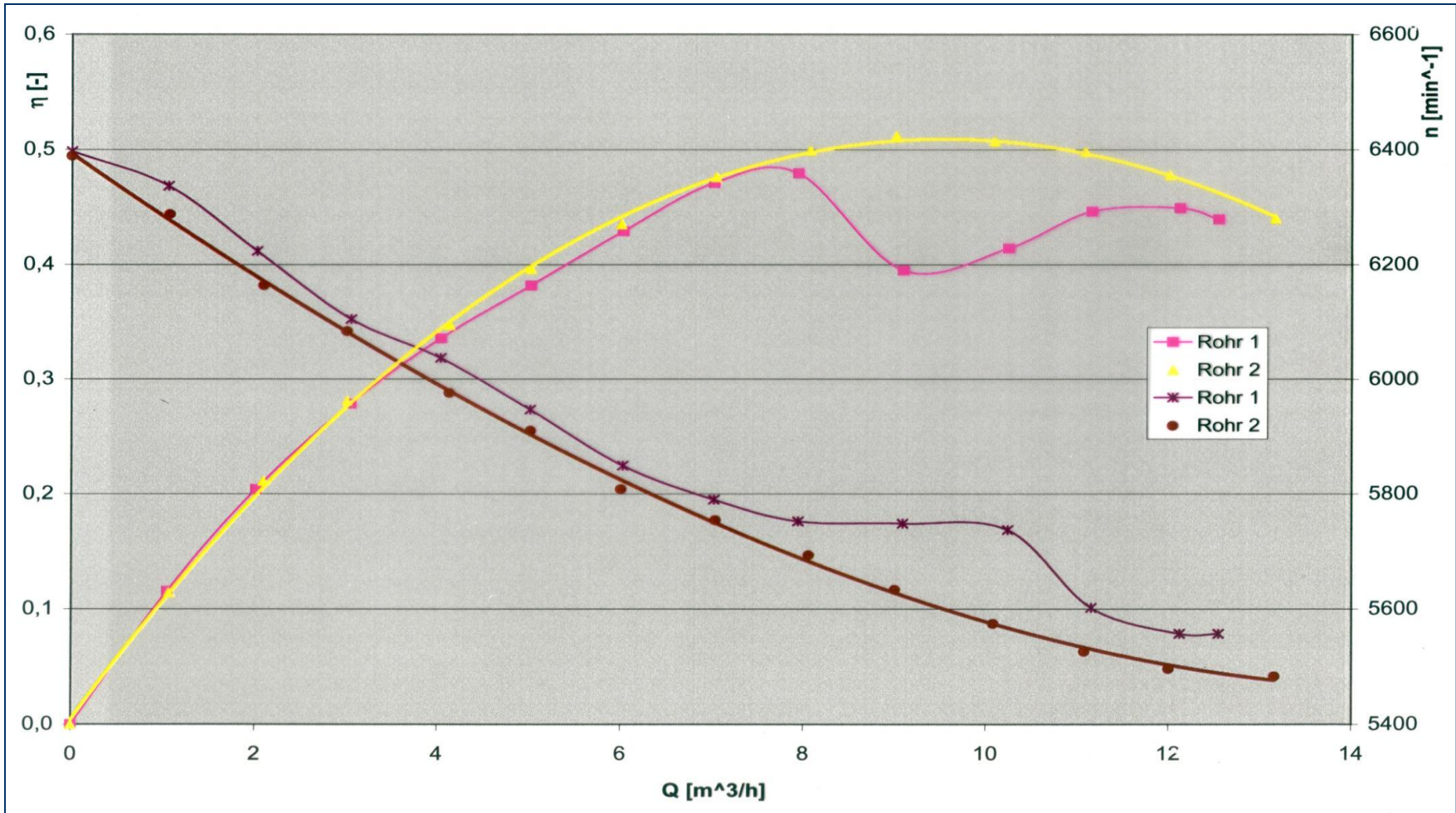


Bild 15: Peripherarad



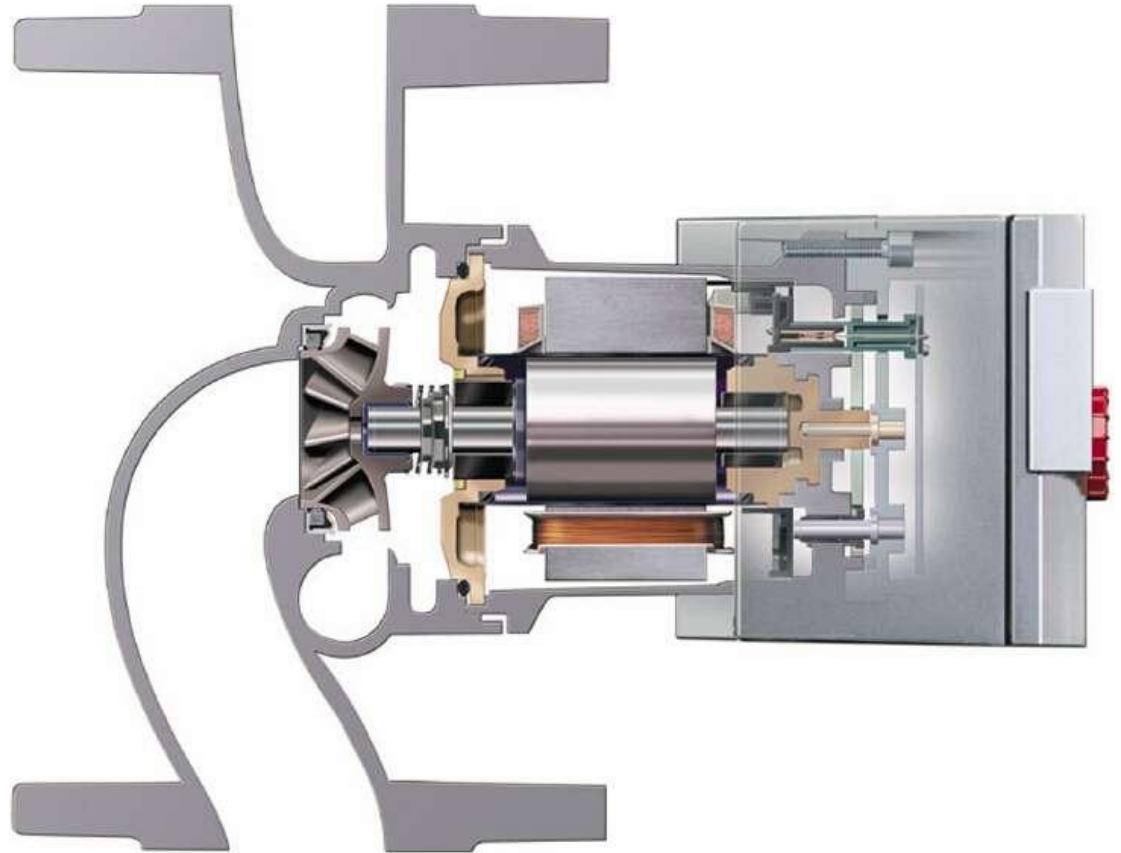
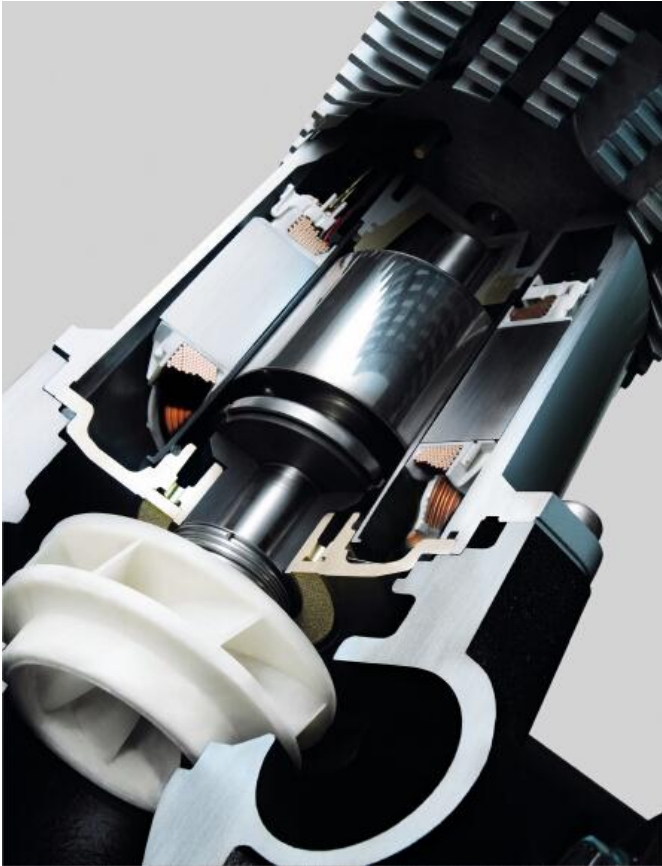
Quelle: KSB Kreiselpumpenlexikon

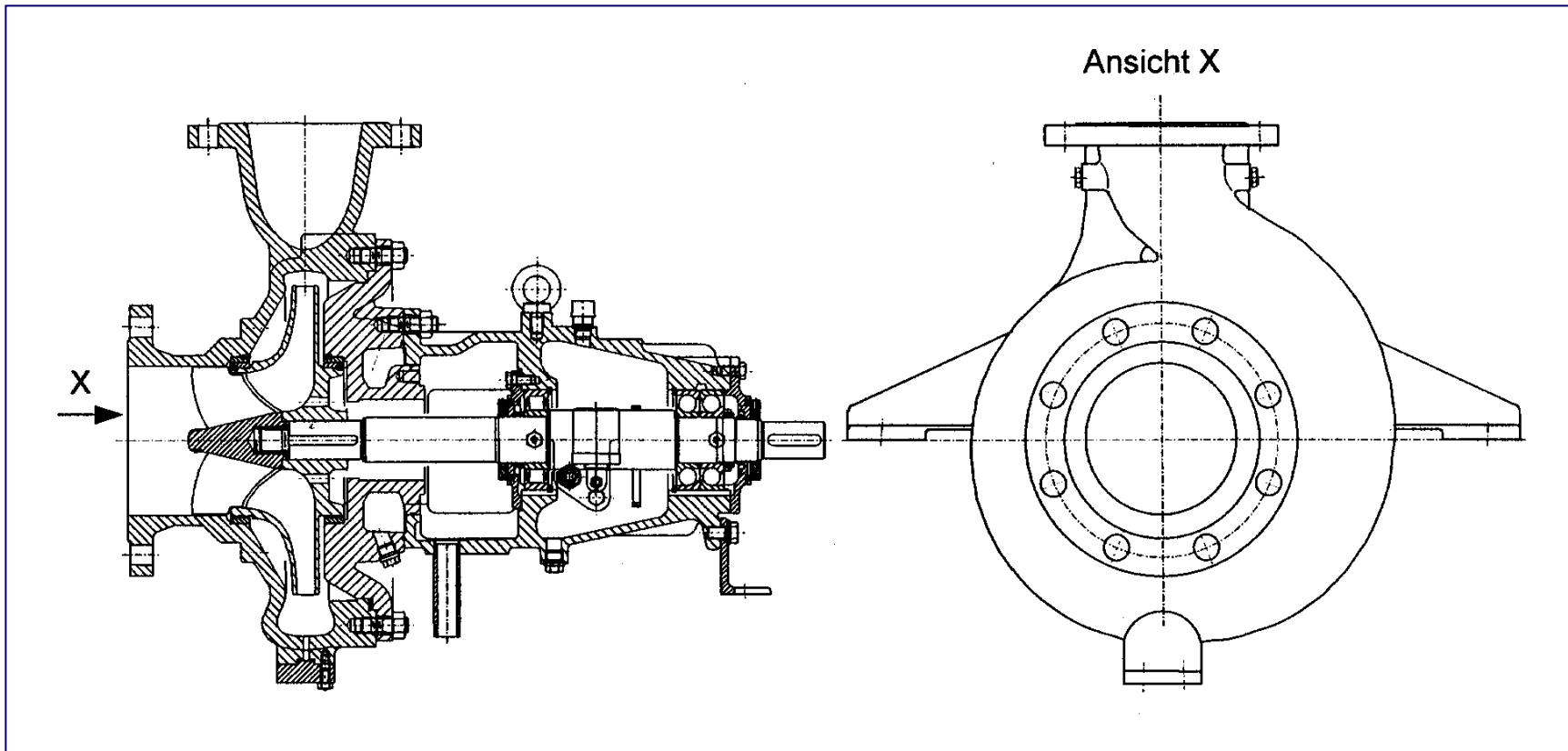




Entwurf von Radialmaschinen

Pumpe mit Antrieb





Einstufige Spiralgehäusepumpe mit Lagerträger, Sulzer Pumpen AG

Entwicklung einer Radialmaschine

Gesamt

- ▶ Design
- ▶ Tests
- ▶ Lebensdauerversuche

Motor

- ▶ Elektrischer Teil
- ▶ Konstruktion
- ▶ Mechanik
- ▶ Komponententests

Elektronik

- ▶ Hardware

- ▶ Software

zur Sicherstellung der Funktionen Motorregelung,
Pumpenregelung, Kommunikation in BUS-Systemen,
Störungsfrüherkennung

- ▶ Komponententests

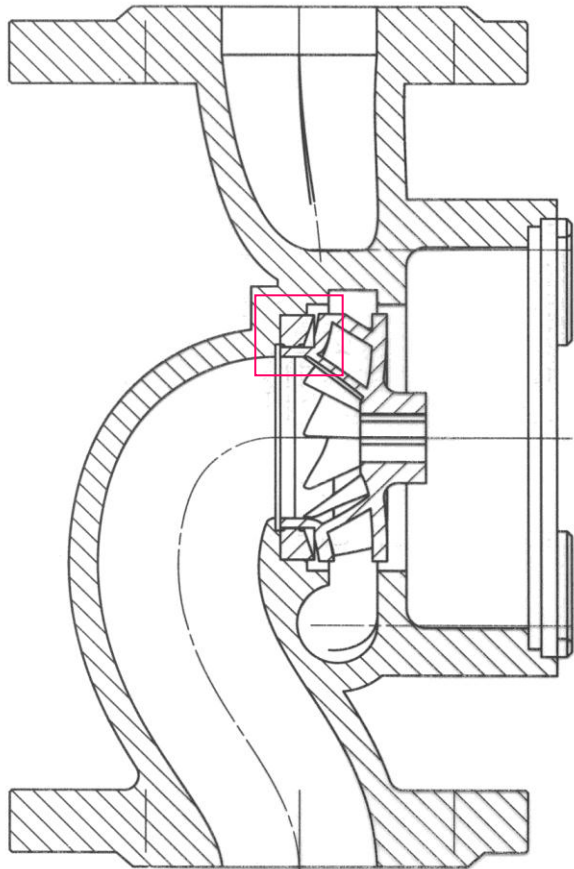
Konstruktion von

- ▶ Welle
- ▶ Dichtelementen
- ▶ Befestigungen
- ▶ Anschlüssen zu anderen Bauelementen
und zum Rohrleitungssystem

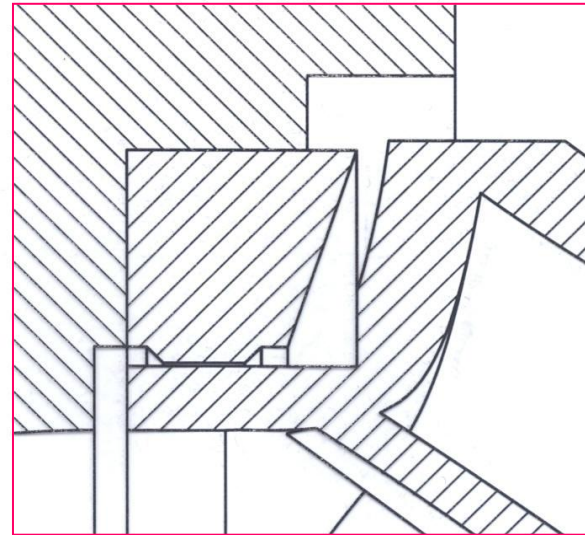
Entwicklung einer Pumpe – hydraulischer Teil

- ▶ Strömungstechnik
- ▶ Konstruktion
- ▶ Mechanik
- ▶ Werkstoffe
- ▶ Komponententests

Baugruppe Hydraulik



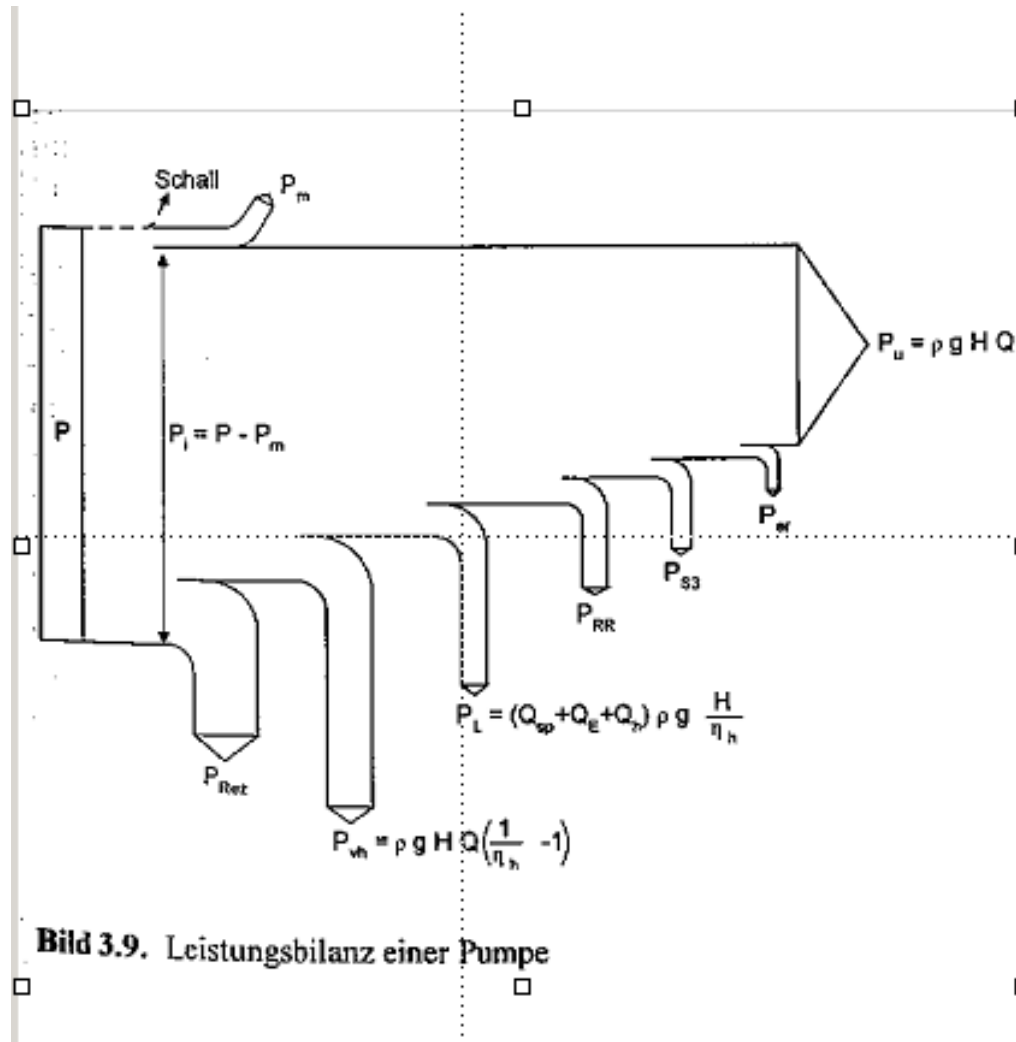
Einzelheit Radseitenraum



$$Y_{th,\infty} = \omega (r_2 c_{3u} - r_1 c_{0u})$$

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

Leistungsbilanz & Wirkungsgrad



Verluste

- ▶ Mechanisch (Lager, Dichtungen, ...) → P_m
- ▶ Volumetrisch (Spalte, Entlastungsbohrung, ...) → P_v
- ▶ Radseitenreibung → P_{Reib}
- ▶ Hydraulische (Fluidreibung, Turbulenz, ...) → P_h
- ▶ Rezirkulation und Austausch → P_{rez}

Mechanische Verluste

- ▶ Radiallager
- ▶ Axiallager
- ▶ Dichtungen

Hydraulische Verluste

- ▶ Einlauf, Lauf- und Leiträder, Gehäuse, Austrittsgehäuse
- ▶ Durch Reibung, Sekundärströmungen, Ablösung, Stoß, Nachläufe, ...

Wirkungsgrade

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P} \quad P_{Nutz} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

Innerer Wirkungsgrad

$$\eta_i = \frac{P_{Nutz}}{P_i} = \frac{\eta}{\eta_m} \quad P_i = P - P_m$$

Mechanischer Wirkungsgrad

$$\eta_m = 1 - \frac{P_m}{P}$$

Hydraulischer Wirkungsgrad

$$\eta_h = \frac{Y}{Y_{Sch}} = \frac{H}{H + Z_{la} + Z_{le} + Z_E + Z_A}$$

Entwurf des hydraulischen Teils

- ▶ Entwurf der Beschau felung für Lauf- und Leiträder
- ▶ Entwurf des Gehäuses
- ▶ Numerische Optimierung
- ▶ ggf. experimentelle Optimierung

Phasen der Entwicklung eines Pumpenbauteiles (am Beispiel Laufrad)

Angewendete Methoden

Entwurf

Pfeiderer, Stepanoff,
Singularitätenverfahren

Konstruktion

2D/3D-CAD

Optimierung unter verschiedenen Gesichtspunkten,
z.B. **strömungstechnisch**, mechanisch, technologisch

Numerische Verfahren

Versuche

Prototypenbau und -test

Modelle ⇒ Abguß

Stereolithografiemodell ⇒ Abguß

Kernfertigung mit Laser ⇒ Abguß

Mehrachsenfräsen

Serieneinführung

Entwurf einer Radialmaschine

Gegeben:

$$\dot{V}, H, NPSH_A$$

- 1. Schritt:** Bestimmung der Hauptabmessungen aus Erfahrungswerten

$$\psi = f(n_q)$$

$$\frac{b_2}{D_2} = f(n_q)$$

$$\frac{D_2}{D_s} = f(n_q)$$

$$Z = f(n_q)$$

$$\dot{V}_R = \frac{\dot{V}_N}{\lambda_1}$$

Entwurf einer Radialmaschine

2. Schritt: Entwurf eines Meridianschnittes

$$c_m = \frac{\dot{V}}{D b \pi}$$

3. Schritt: Berechnung des Meridiangeschwindigkeitsfeldes und
Festlegen der Lage von Ein- und Austrittskante

4. Schritt: Bestimmung der Strömungswinkel $\alpha_0, \beta_0, \alpha_3, \beta_3$
auf mehreren Stromlinien

5. Schritt: Bestimmung der Schaufelwinkel β_1, β_2
z.B. mit dem Verfahren von Pfeleiderer
auf mehreren Stromlinien

Entwurf einer Radialmaschine

6. Schritt: Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten und

Festlegen eines ω -Verlaufes oder β -Verlaufes auf mehreren Stromlinien

7. Schritt: Korrektur des Meridiangeschwindigkeitsfeldes

Iteration

Geometrische Beschreibung des gesamten Entwurfs und ggf.

Glättung bzw. Anpassung an gewünschtes Fertigungsverfahren

8. Schritt: Optimierung - strömungstechnisch mit CFD

- strukturmechanisch mit FEM

Entwurf einer Radialmaschine

9. Schritt: Entwurf der Leiteinrichtung

10. Optimierung von Laufrad und Leiteinrichtung

Zuströmung berücksichtigen!

$$Y_{th,\infty} = \omega (r_2 c_{3u} - r_1 c_{0u})$$

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

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

Gleichung von Leonard Euler

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

$$Y = \eta_h Y_{th}$$

p ... Minderleistungsfaktor nach Pfeleiderer

Entwurf einer Radialmaschine

Verfahren von Pfeleiderer

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

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

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

$$S = \int_{r_1}^{r_2} r \, dx$$

Zahlenbeispiel für einen Mittelschnell-Läufer (FRANCIS-Rad)

Austritt berücksichtigen, so ergibt sich bei einer Wandstärke $s=4$ mm (die gleich der in der Flußfläche erscheinenden Schnittbreite s'_2 trotz der voraussichtlichen Schrägstellung der Austrittskante in Umfangsrichtung gesetzt wird, weil andererseits die Zuschärfung am Austritt unberücksichtigt bleibt) $\sigma_2 = 4 / \sin\beta_2 = 9,13$, ferner $t_2 = \pi D_2 / z$

