

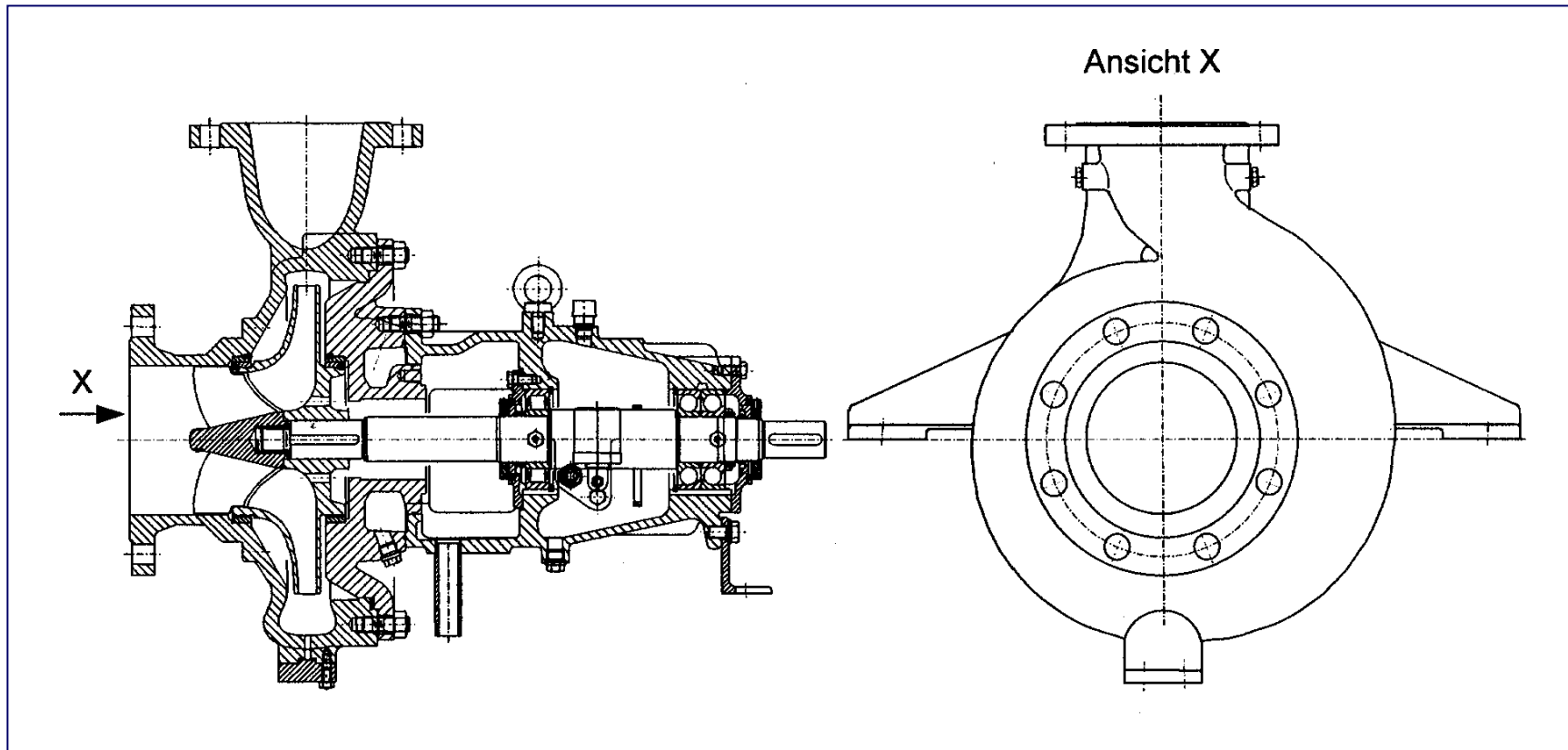
Wintersemester 2010/2011

Strömungsmaschinen I

Prof. Dr. Hendrik Wurm

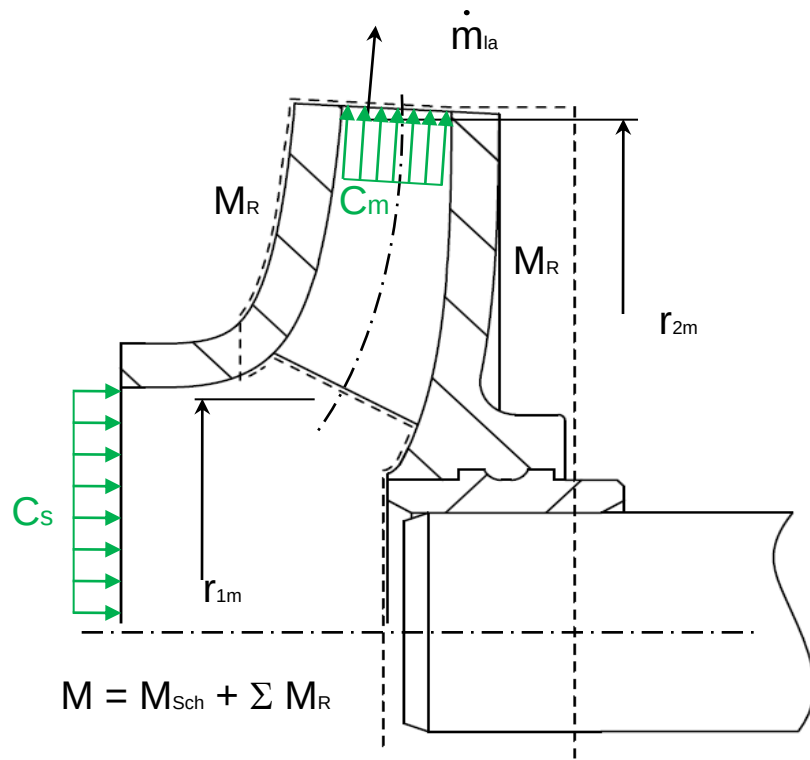
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Entwurf von Radialmaschinen,
Ähnlichkeit
Optimierung von Radialmaschinen

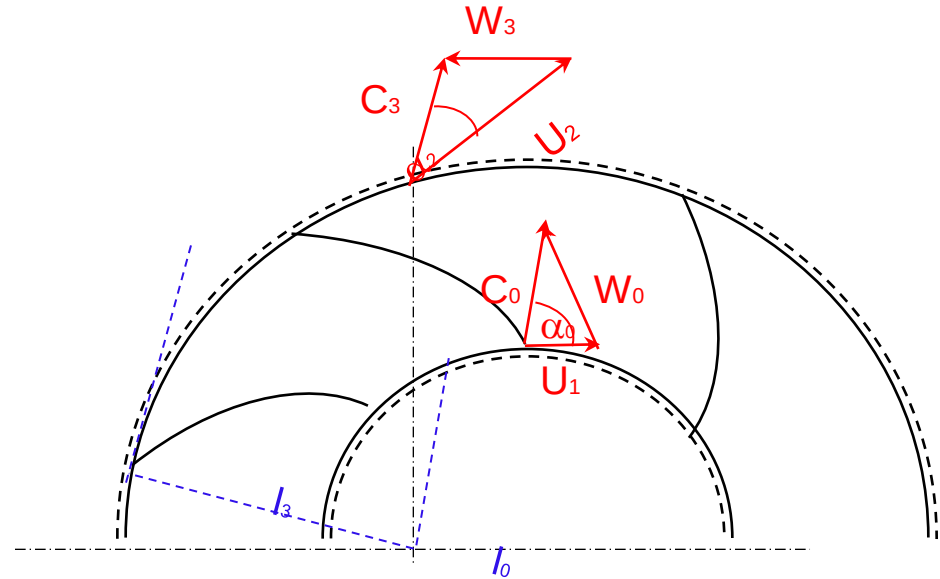


Einstufige Spiralgehäusepumpe mit Lagerträger, Sulzer Pumpen AG

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

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

an der Welle übertragenes Moment

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

von den Schaufeln übertragenes Moment

mit $u = \omega r$

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

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

spezifische Förderarbeit

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

**Euler'sche Turbinengleichung
(1754)**

Ziel: Realisierung des geforderten Dralls $c_{3u} * r_{2m}$

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

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

$$H_{th,\infty} = \frac{Y_{Sch}}{g}$$

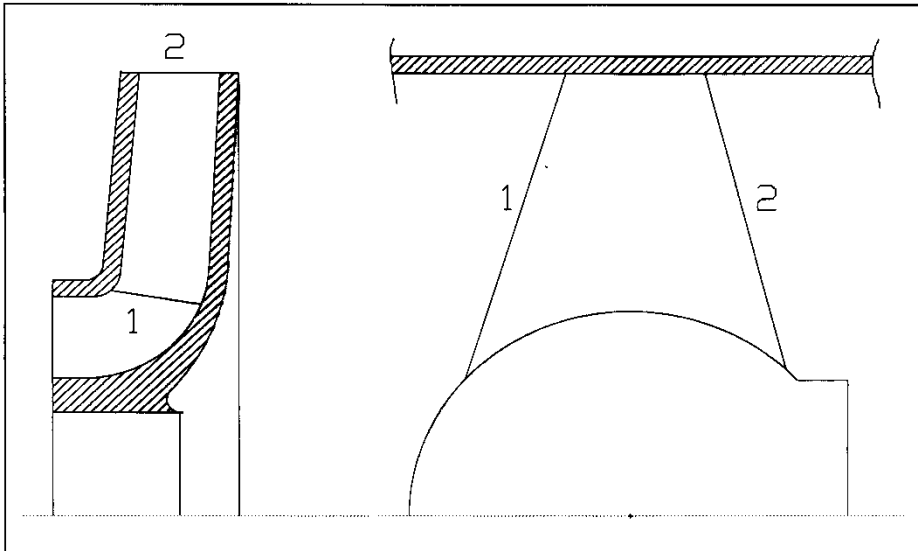
$$g \times H_{th} = \left[U_2 C_{2U} - U_1 C_{1U} \right] \quad \text{Gleichung von L. Euler}$$

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

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

Minderumlenkung, Deviationswinkel – Verhältnisse am LR- Austritt

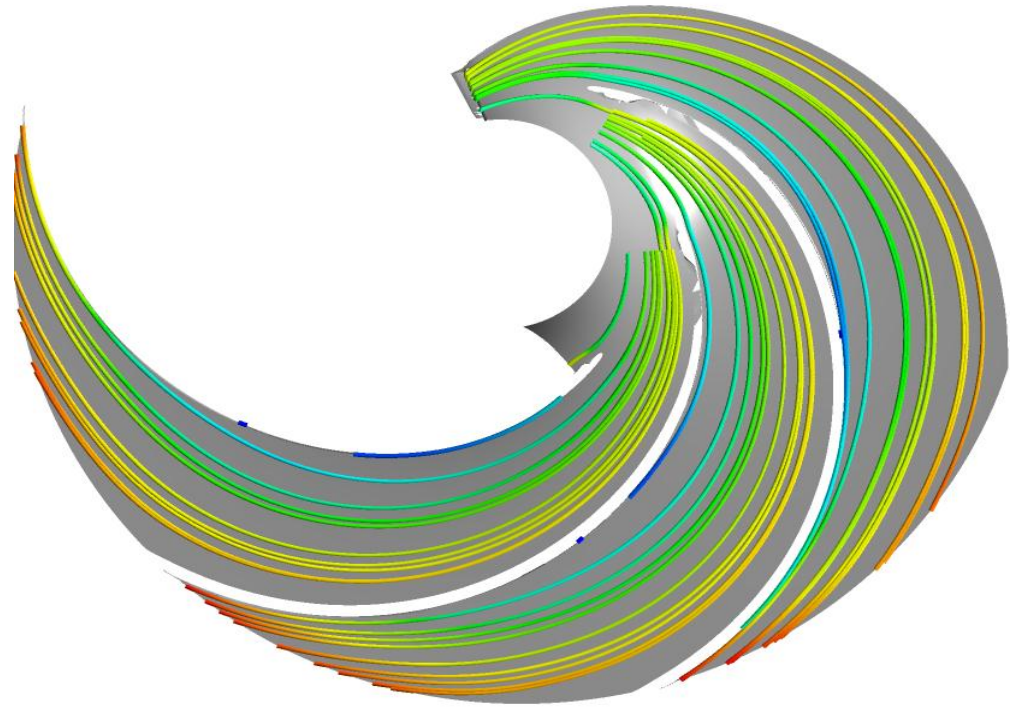
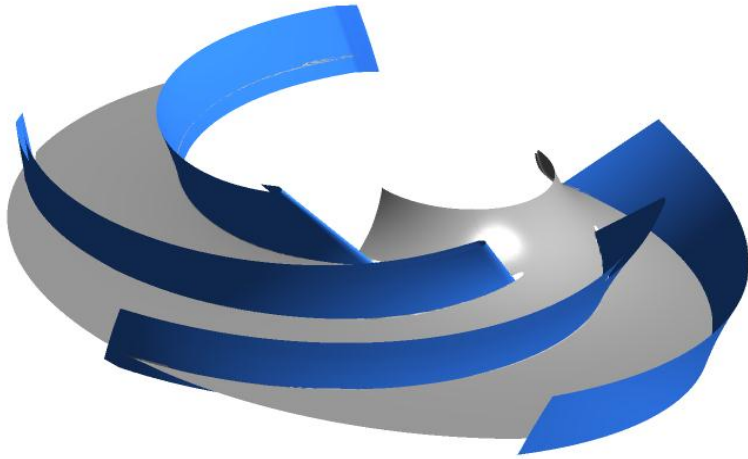
In der Realität ist die Abströmung aus dem Laufrad nicht schaufelkongruent.

Ursachen: 1) der relative Kanalwirbel (Sekundärströmung von der SS zur DS durch Corioliskräfte)

2) Reduzierung des Druckunterschiedes zwischen SS und DS im „Schrägabschnitt“

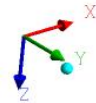
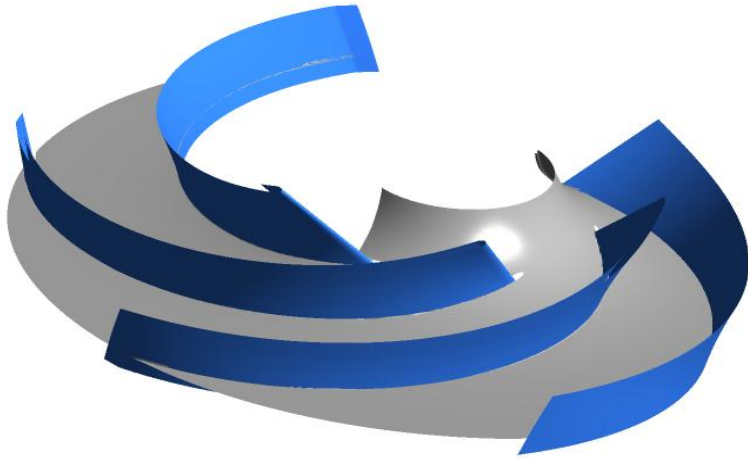
Deviationswinkel: $\delta = \beta_s - \beta_3$

$$\beta_s = \beta_2$$



Radialrad mit Schaufeln

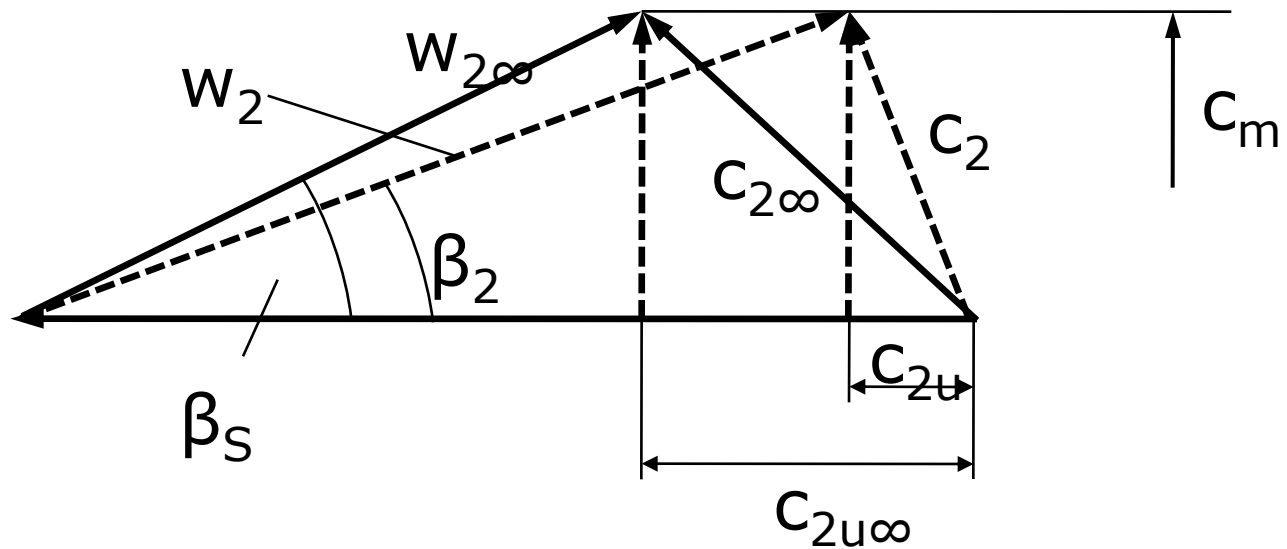
Minderumlenkung



Radialrad

Statischer Druckaufbau in den Laufradkanälen

Auswirkung der Minderumlenkung



Verfahren von Pfeiderer, Stepanoff, Gülich

- ▶ Exemplarisch wird das Verfahren von Pfeiderer gezeigt

Empirisches Verfahren zur Abschätzung der Minderumlenkung

$$Y_{th\infty} = u_2 c_{3u} - u_1 c_{0u} \quad \text{Gleichung von Leonard Euler}$$

$$Y_{th} = \frac{Y_{th\infty}}{p + 1} \quad p \dots \text{Minderleistungsfaktor nach Pfeleiderer}$$

Entwurf des Laufrads 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

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

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

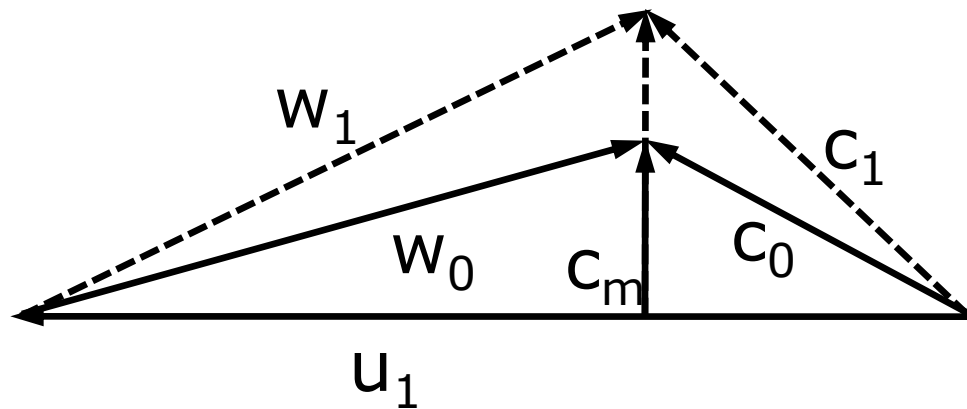
$$c_{1m} = \tau_1 \cdot c_{0m}$$

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

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

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

Auswirkung der Schaufelversperrung



Relativbahnwinkel

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

$$\beta_3 = \arctan \frac{c_{3m}}{u_2 - c_{3u}}$$

Entwicklung des Schaufelverlaufes

► Kreisbogen

► β - Verlauf

► W- Verlauf

$$w = \frac{c_m}{\sin \beta}$$

Ähnlichkeitsbeziehungen

- a) geometrische Ähnlichkeit
- b) Dynamische Ähnlichkeit

geometrische Ähnlichkeit

Alle Abmessungen von Großausführung und Modell haben das gleiche Maßstabsverhältnis.

z.B. $\lambda_D = \frac{D}{D_M}$

dynamische Ähnlichkeit

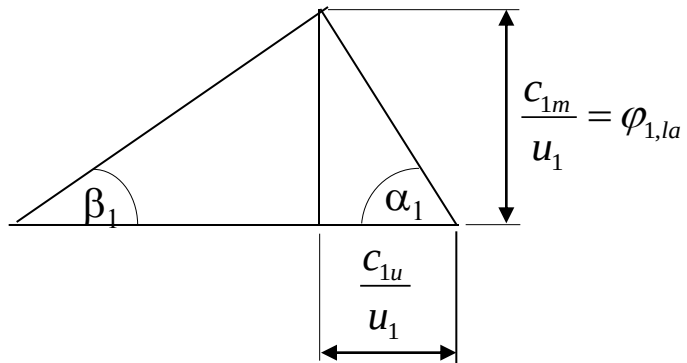
$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad \text{Reynolds- Zahl, Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskraft}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad \text{Froude- Zahl, Verhältnis von kinetischer und potentieller Energie}$$

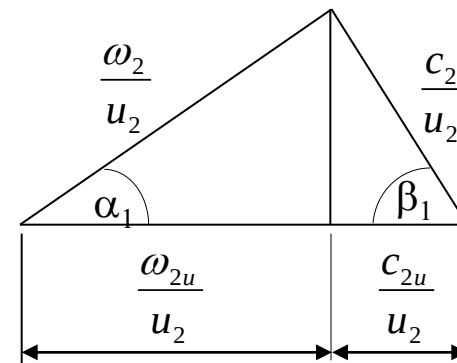
$$Eu = \frac{p}{\rho v^2} \quad \text{Euler- Zahl, Druckverhältnisse}$$

Ähnlichkeit von Laufrädern

Eintritt



Austritt



Für geometrische ähnliche Laufräder werden die Geschwindigkeitsdreiecke allein durch c_m/u und c_u/u festgelegt

Durchflußzahl

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{\pi b d u}$$

Ähnlichkeit von Laufrädern

Druckzahl

$$\psi = \frac{2Y}{u_2^2}$$

Verhältnis der spezifischen Förderarbeit zur mit u gebildeten Geschwindigkeitsenergie

$\psi = f(\varphi)$ ist eine dimensionslose Darstellung unabhängig von n und D_2

Spezifische Drehzahl

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q_{opt}}}{H_{opt}^{0,75}}$$

Entwurf des hydraulischen Teils

- ▶ Entwurf der Beschaufelung 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,
Gülich

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

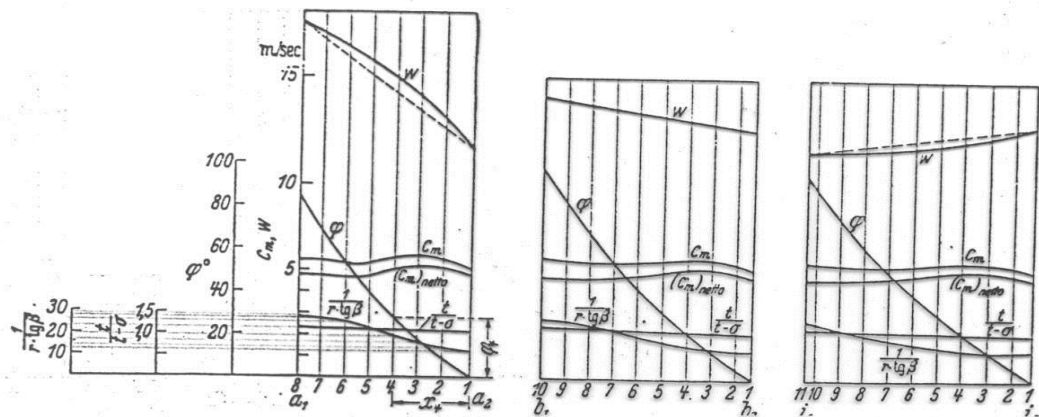
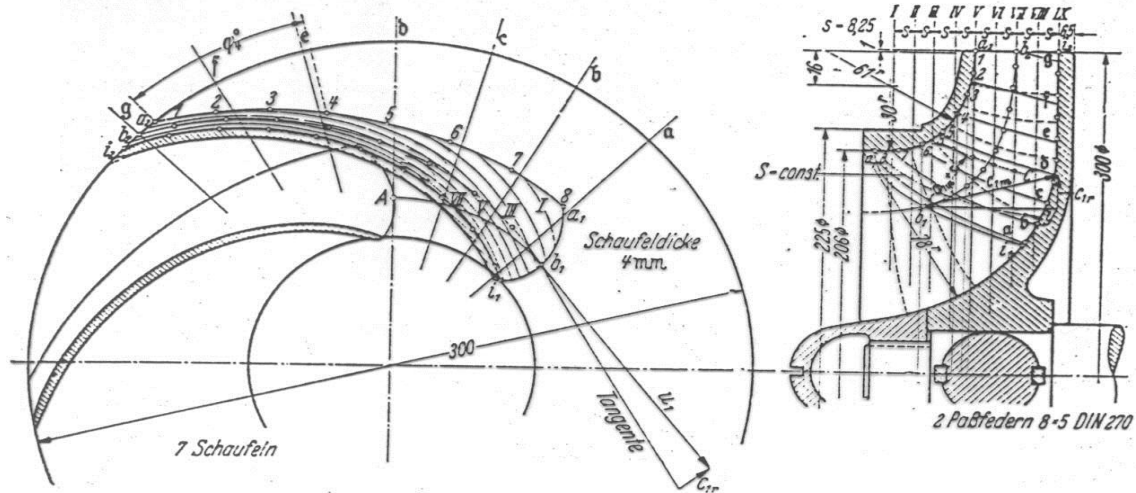
Entwurf einer Radialmaschine

9. Schritt: Entwurf der Leiteinrichtung

10. Optimierung von Laufrad und Leiteinrichtung

Zuströmung berücksichtigen!

Beispiel



Berücksichtigung von Fertigungsverfahren und Kosten

- ▶ doppelt gekrümmte Schaufeln mit Freiformflächen
- ▶ doppelt gekrümmte Schaufeln mit Regelflächen
- ▶ einfach gekrümmte Zylinderschaufeln (2D- Schaufeln)

Ziele:

- ▶ Verlustminimierung
- ▶ Geräuschminimierung
- ▶ Vermeidung von Kavitation
- ▶ Kräfte minimierung
- ▶ Systemoptimierung

Herangehensweise an Berechnungsaufgaben

1. Rechnernetz erzeugen
2. Rand- und Anfangsbedingungen festlegen
3. Berechnung
4. Ergebnisse auswerten

Zeitbedarf

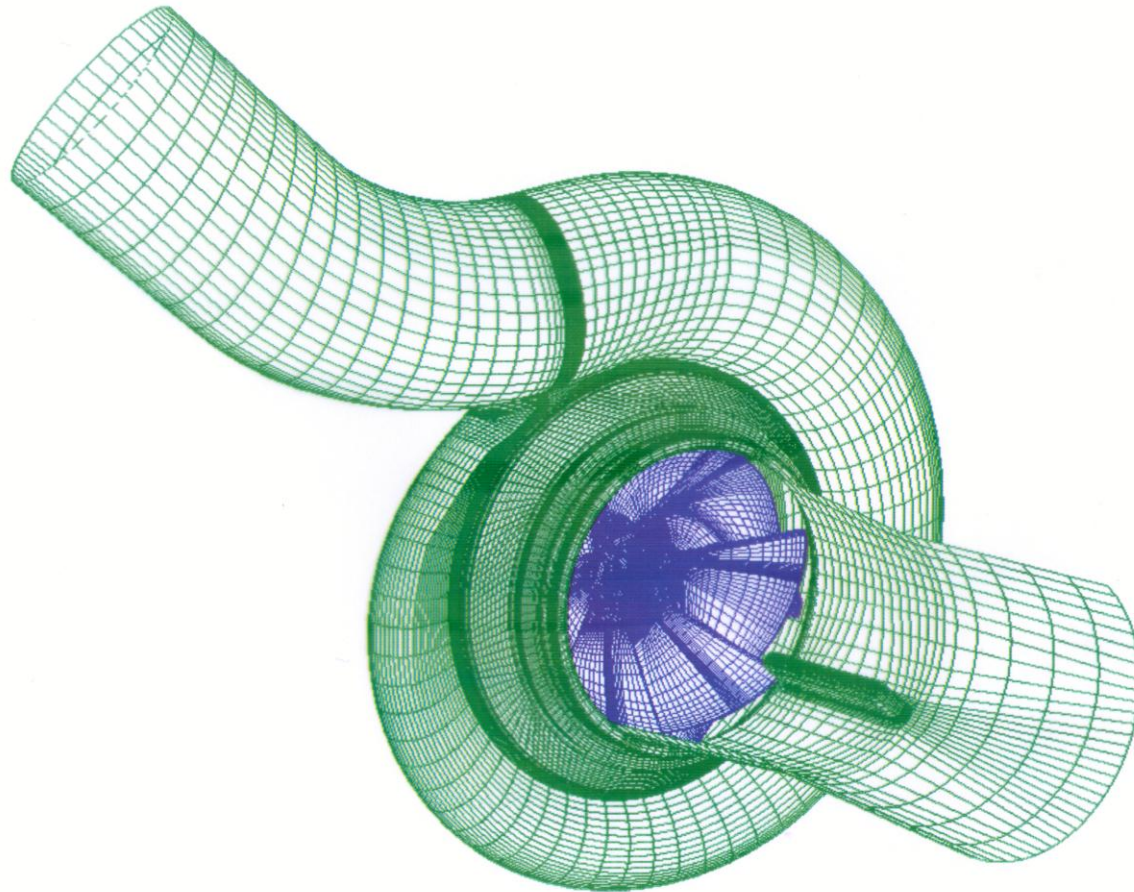
- 1.+2. einige Stunden bis mehrere Wochen
3. Beispiel 3D- Berechnung der Strömung in einem Pumpenlaufrad:
 - a) stationär: einige Stunden
 - b) instationär: Tage bis Wochen auf Parallelrechnern
4. abhängig vom Ziel der Berechnungen

Hydraulischer Wirkungsgrad durch Optimierung

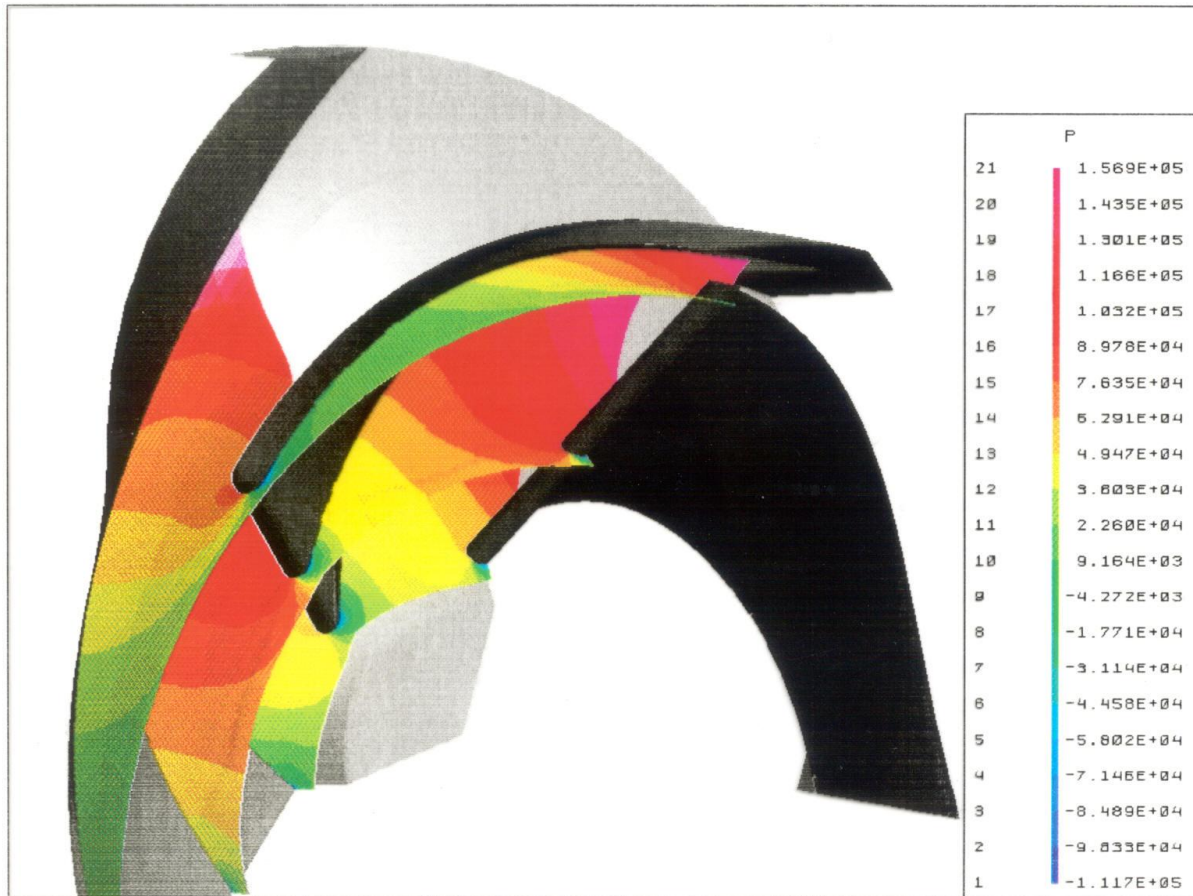
Wirkungsgrad vor der Optimierung	Wirkungsgrad nach der Optimierung	Differenz	Hauptkomponenten optimiert
[%] gemessen	[%] gemessen	[% Punkt]	
59	73	14	dünnere Welle, neues Laufrad, neuer Saugkrümmer
69	73	4	neues Laufrad, dünnere Welle
59	77	18	dünnere Welle, neues Laufrad, neuer Saugkrümmer
66	74	8	neues Laufrad und Spiralgehäuse

Rechengitter

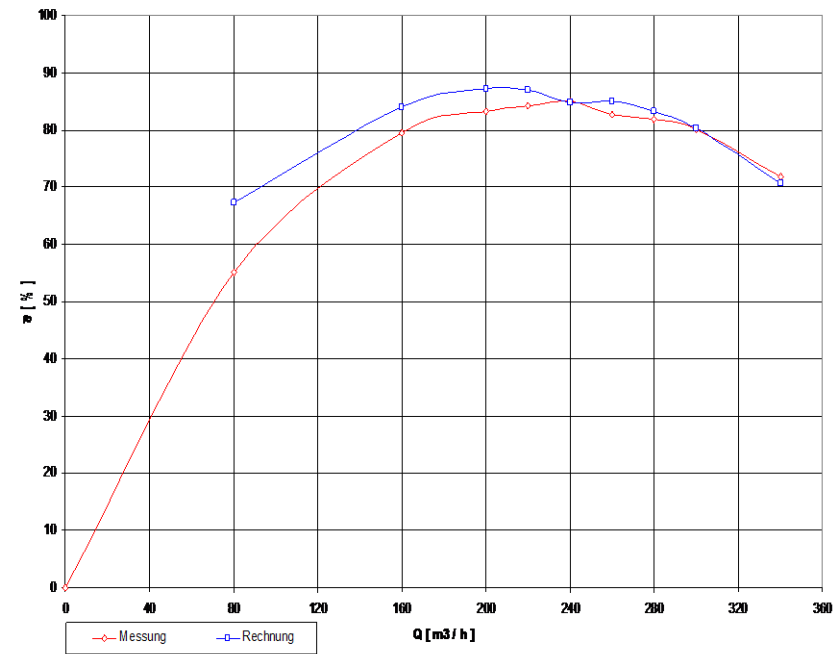
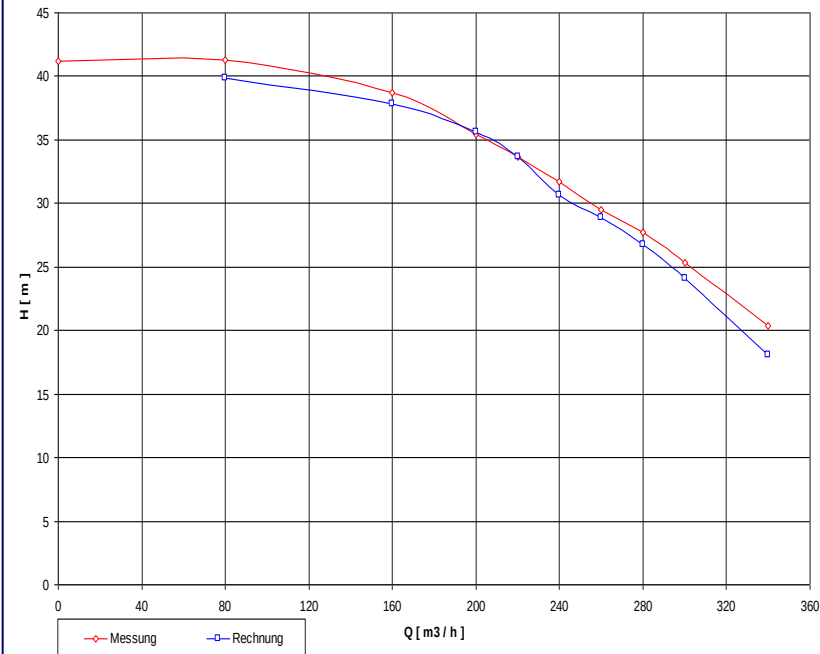
BL 80/175



Position des Staupunktes



Vergleich zwischen Messung und Simulation



Numerische Optimierung des Laufrades einer Abwasserpumpe

Auslegungspunkt:

Förderhöhe $H = 60 \text{ m}$

Volumenstrom $Q = 350 \text{ l/s}$

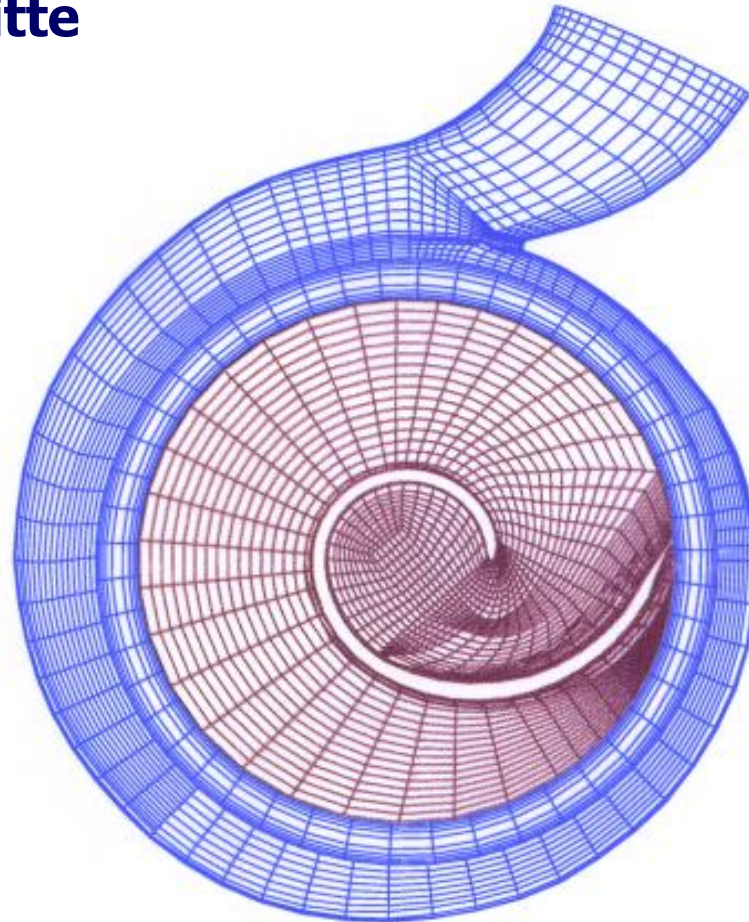
Drehzahl $n = 950 \text{ l/Min.}$

Schaufelzahl $z = 3$

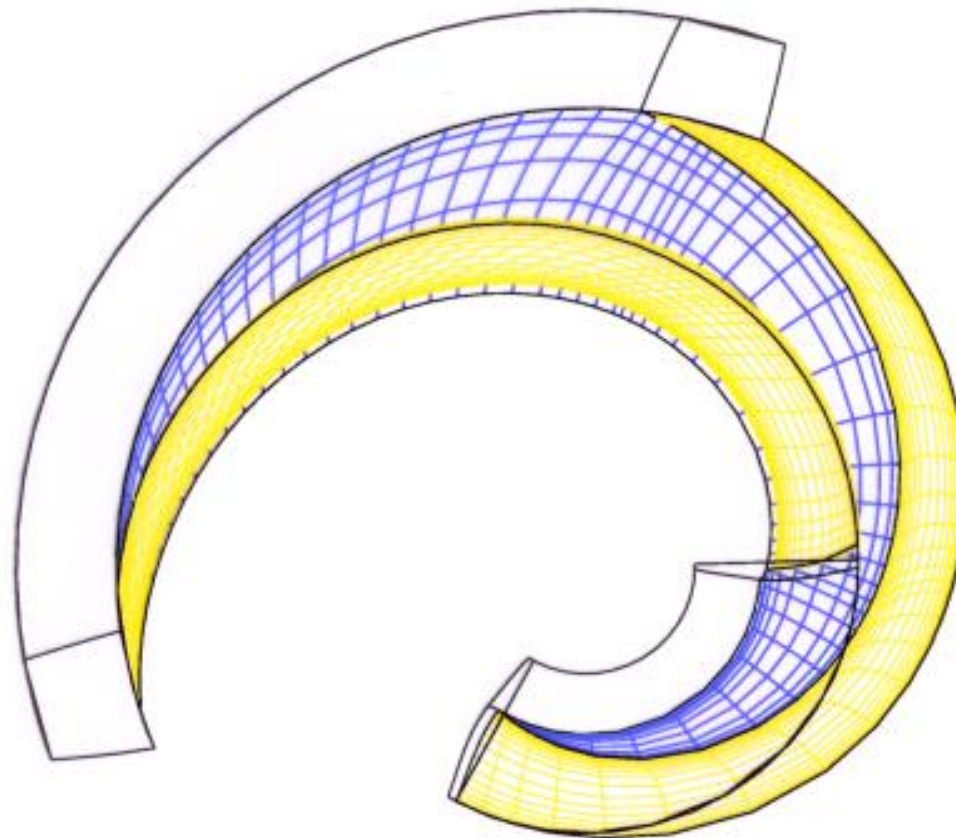
Saugleitung $d = 400 \text{ mm}$

Druckleitung $d = 300 \text{ mm}$

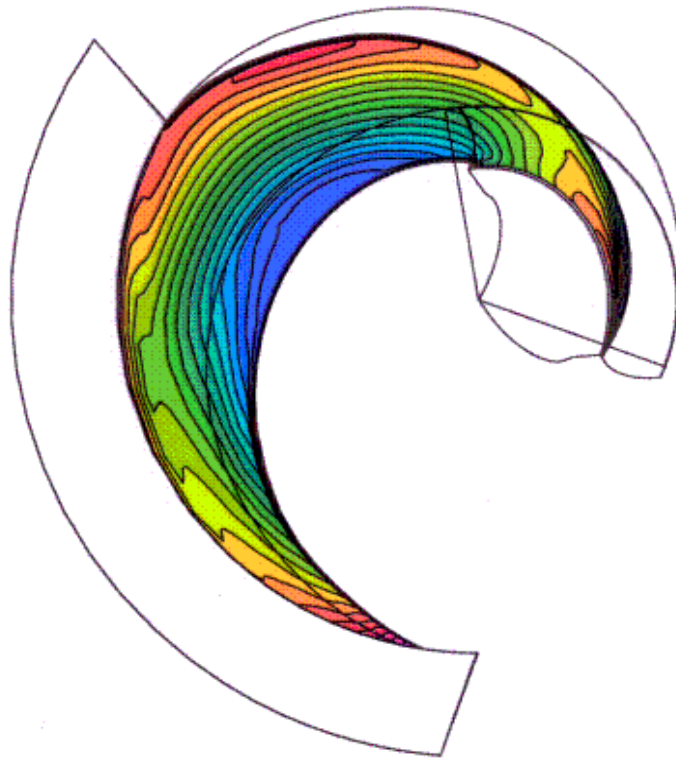
Abwasserpumpe Mitte



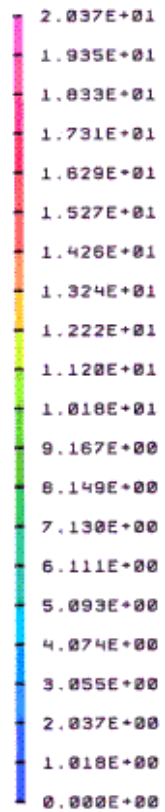
Geometrie



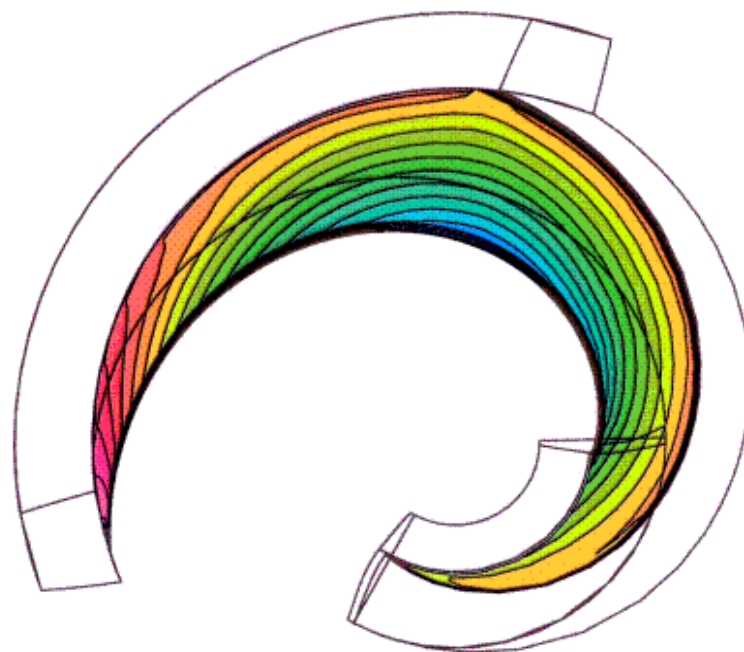
TEST1 . TS



SPEED



TEST2 . TS



SPEED

2.007E+01
1.906E+01
1.806E+01
1.706E+01
1.605E+01
1.505E+01
1.404E+01
1.304E+01
1.204E+01
1.103E+01
1.003E+01
9.031E+00
8.028E+00
7.024E+00
6.021E+00
5.017E+00
4.014E+00
3.010E+00
2.007E+00
1.003E+00
0.000E+00

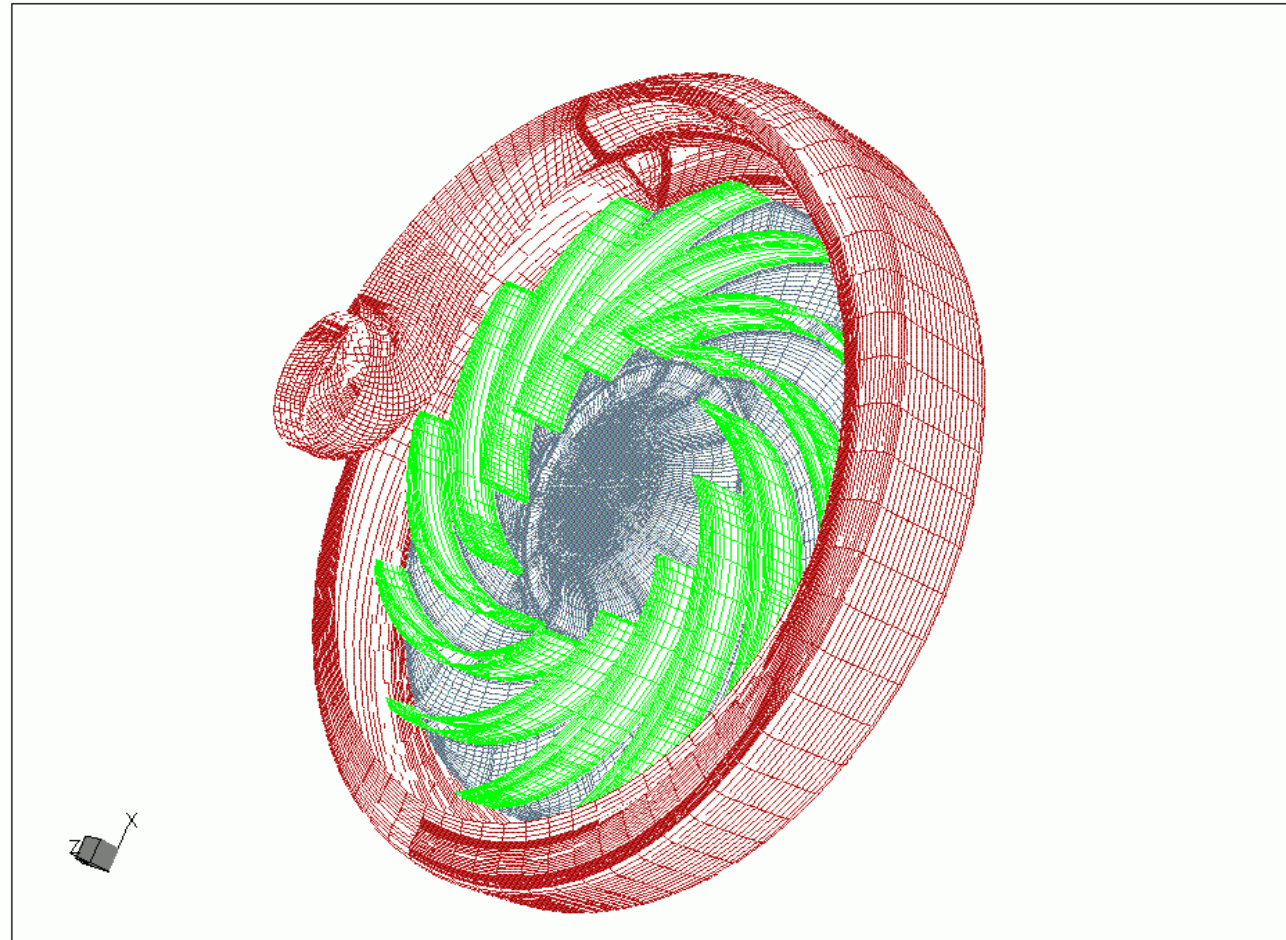
Numerische Optimierung des Laufrades einer Abwasserpumpe

Ergebnisse:

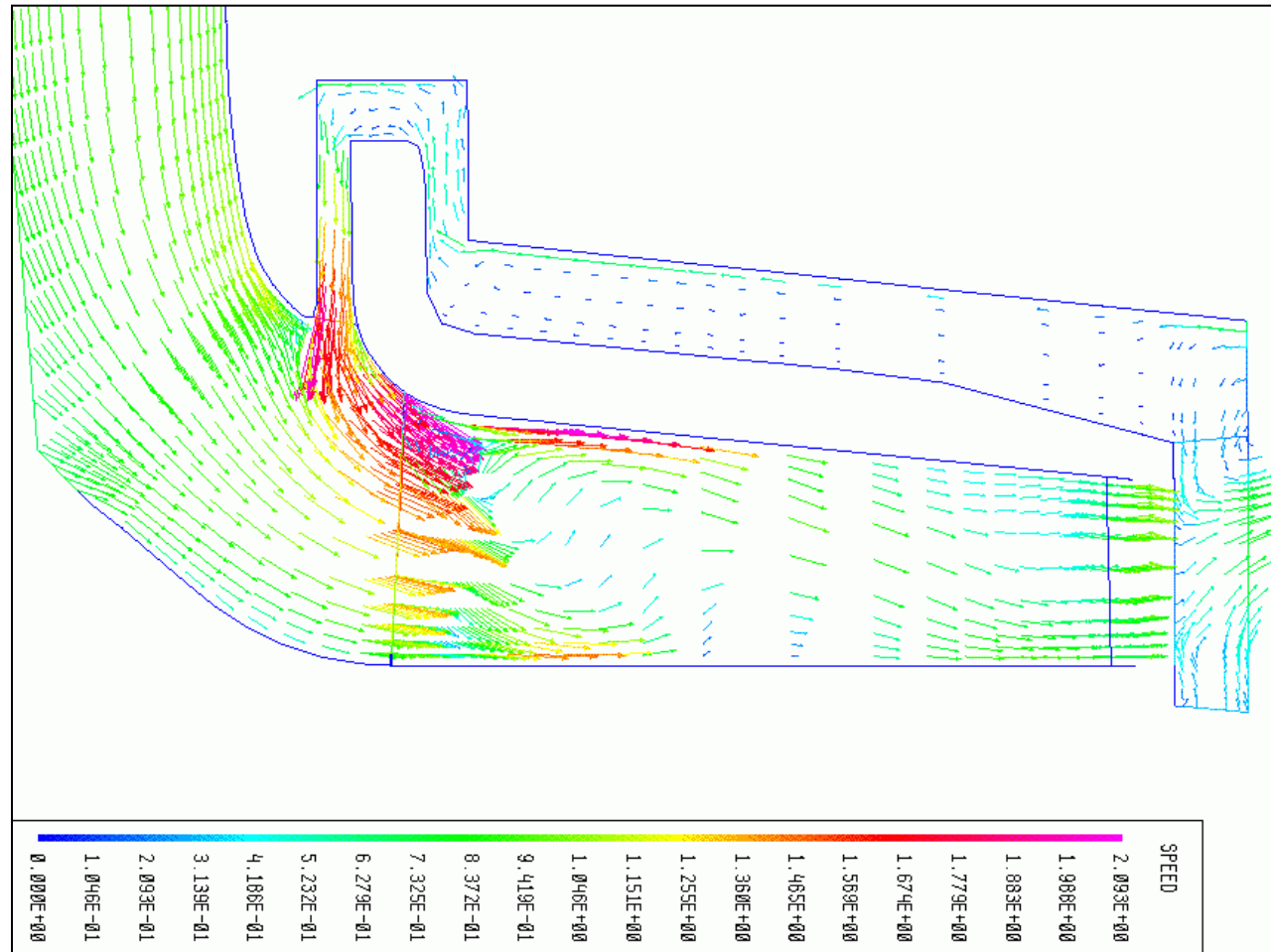
Bei Verwendung des optimierten Laufrades ist bei gleichem Laufraddurchmesser
im Bestpunkt der Maschine

- die Förderhöhe um 11,4% größer
- der Wirkungsgrad um ca. 11 %- Punkte höher.

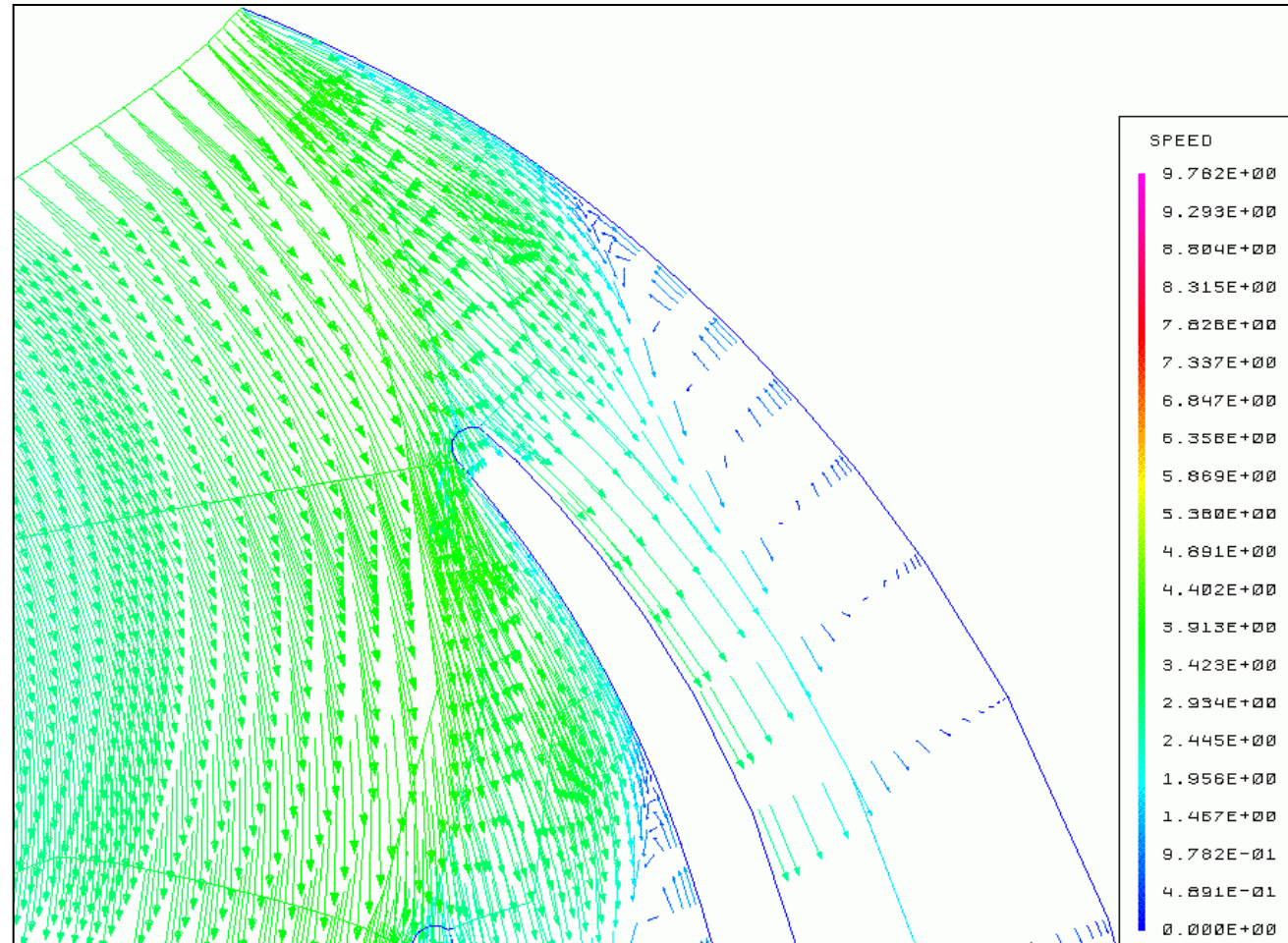
Rechengitter



Meridionale
Geschwindigkeitsvert.
($Q=Q_{\text{opt}}$)

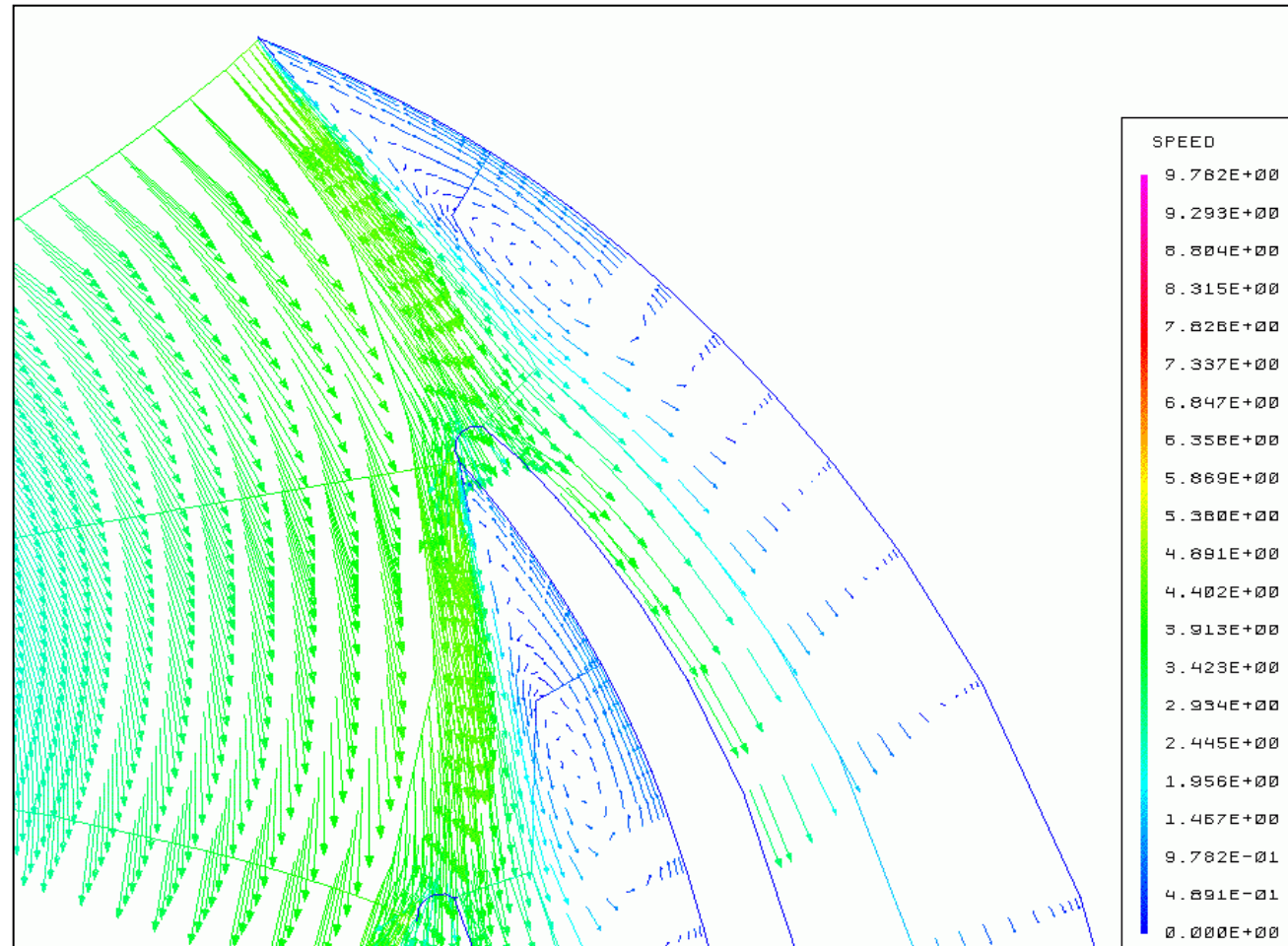


Geschwindigkeits-
verteilung
($Q=Q_{\text{opt}}$)

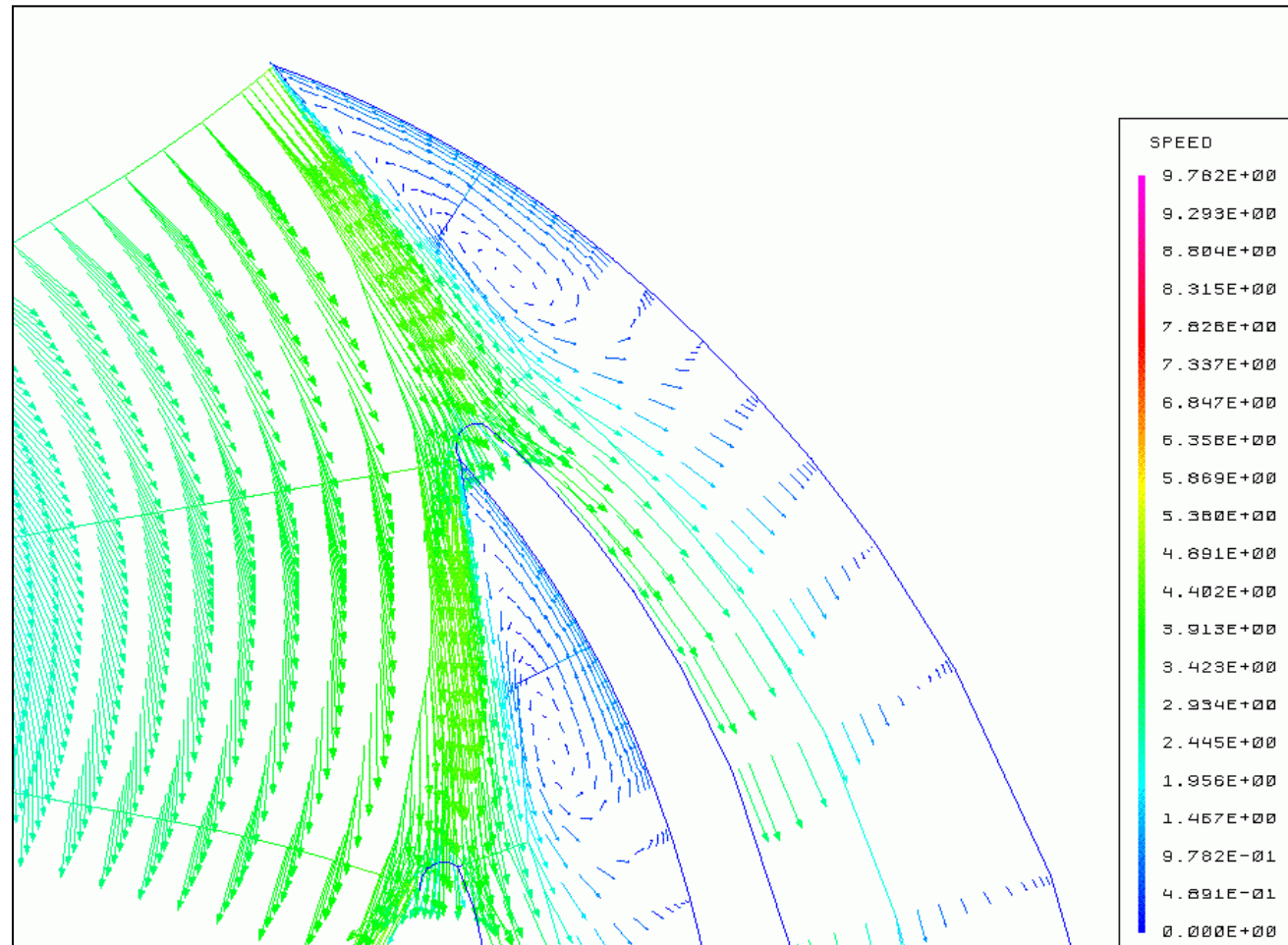


Geschwindigkeits-
verteilung

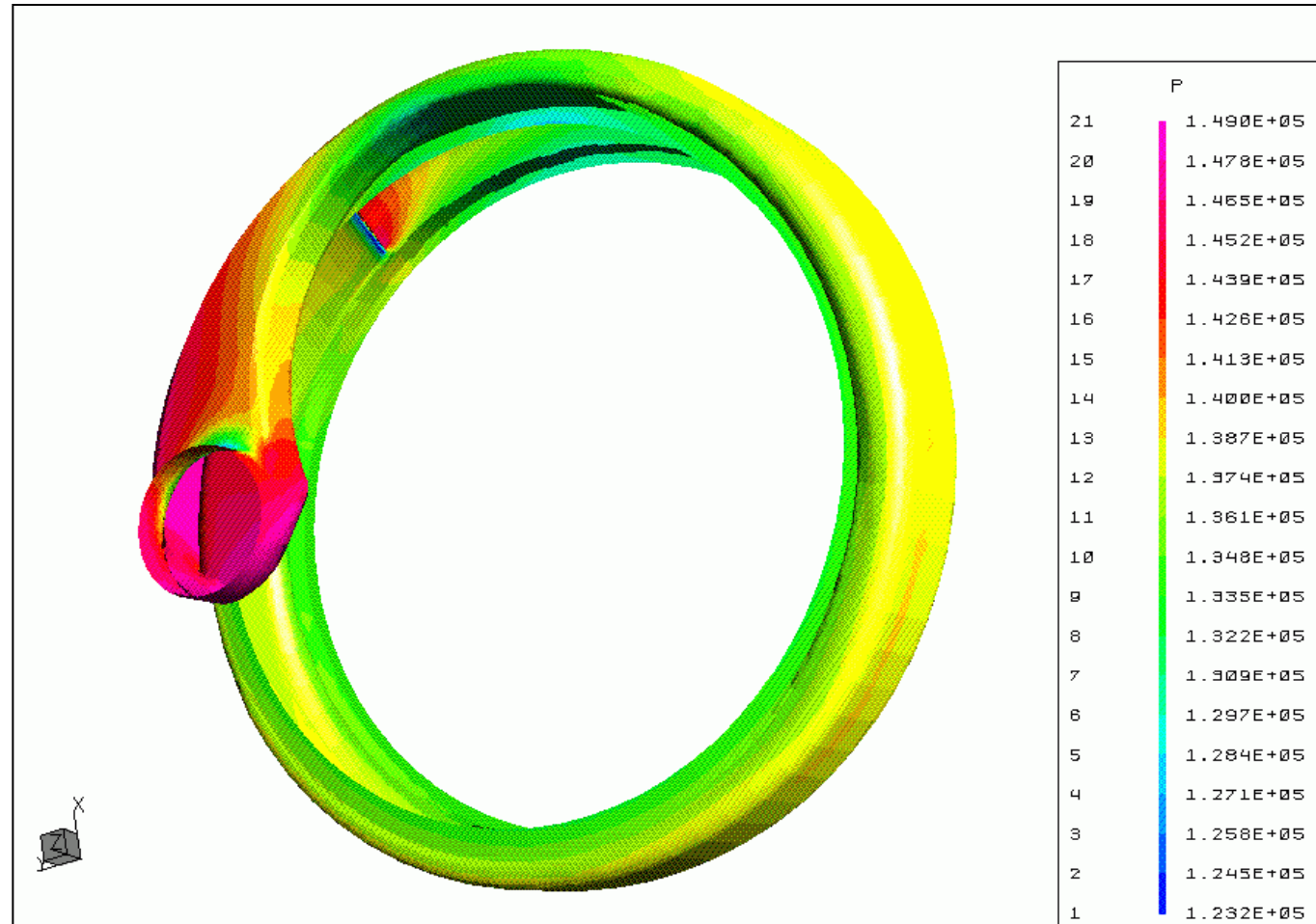
Mittelebene ($Q=Q_{\text{opt}}$)



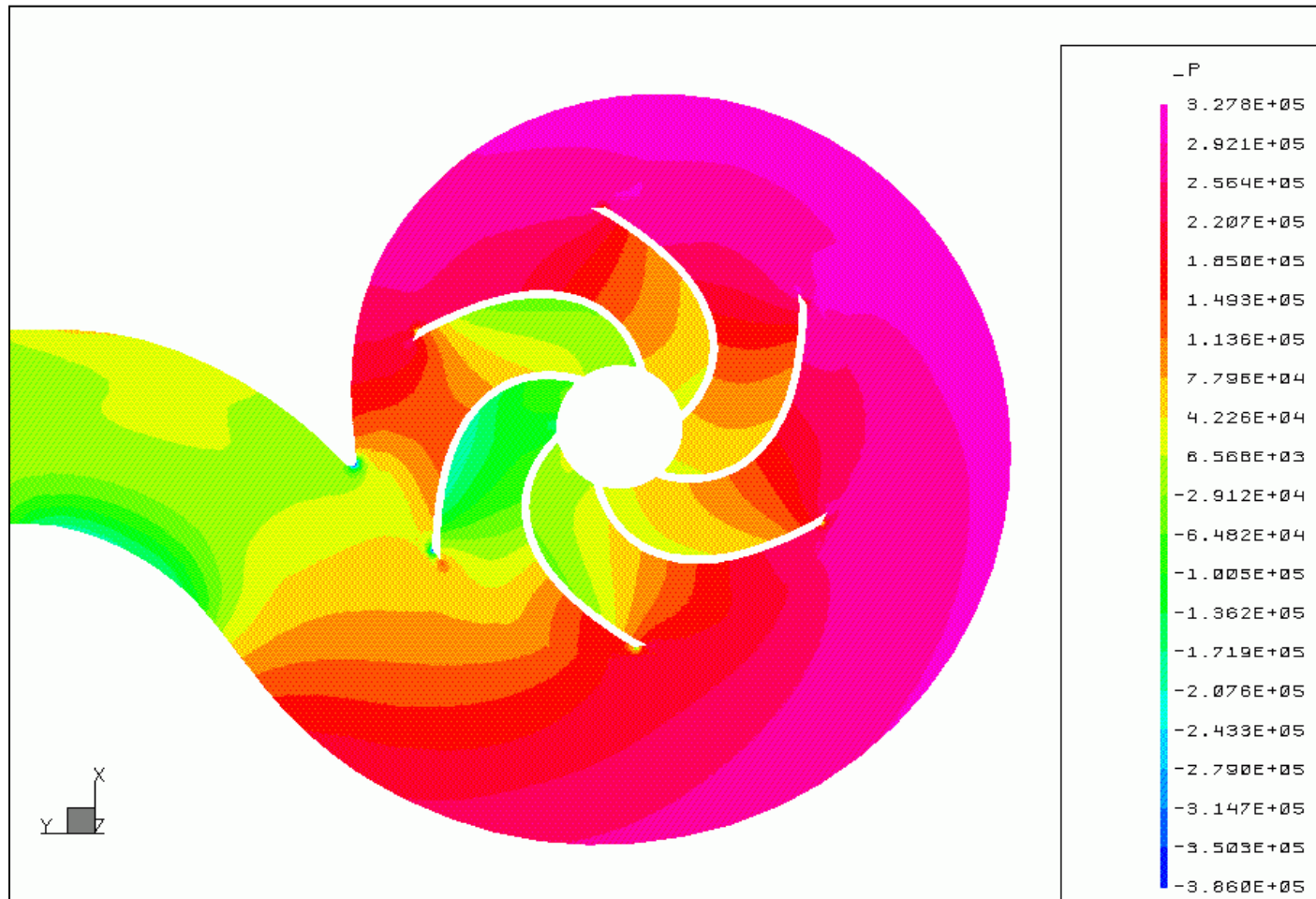
Geschwindigkeits-
verteilung
Nabe ($Q=Q_{\text{opt}}$)



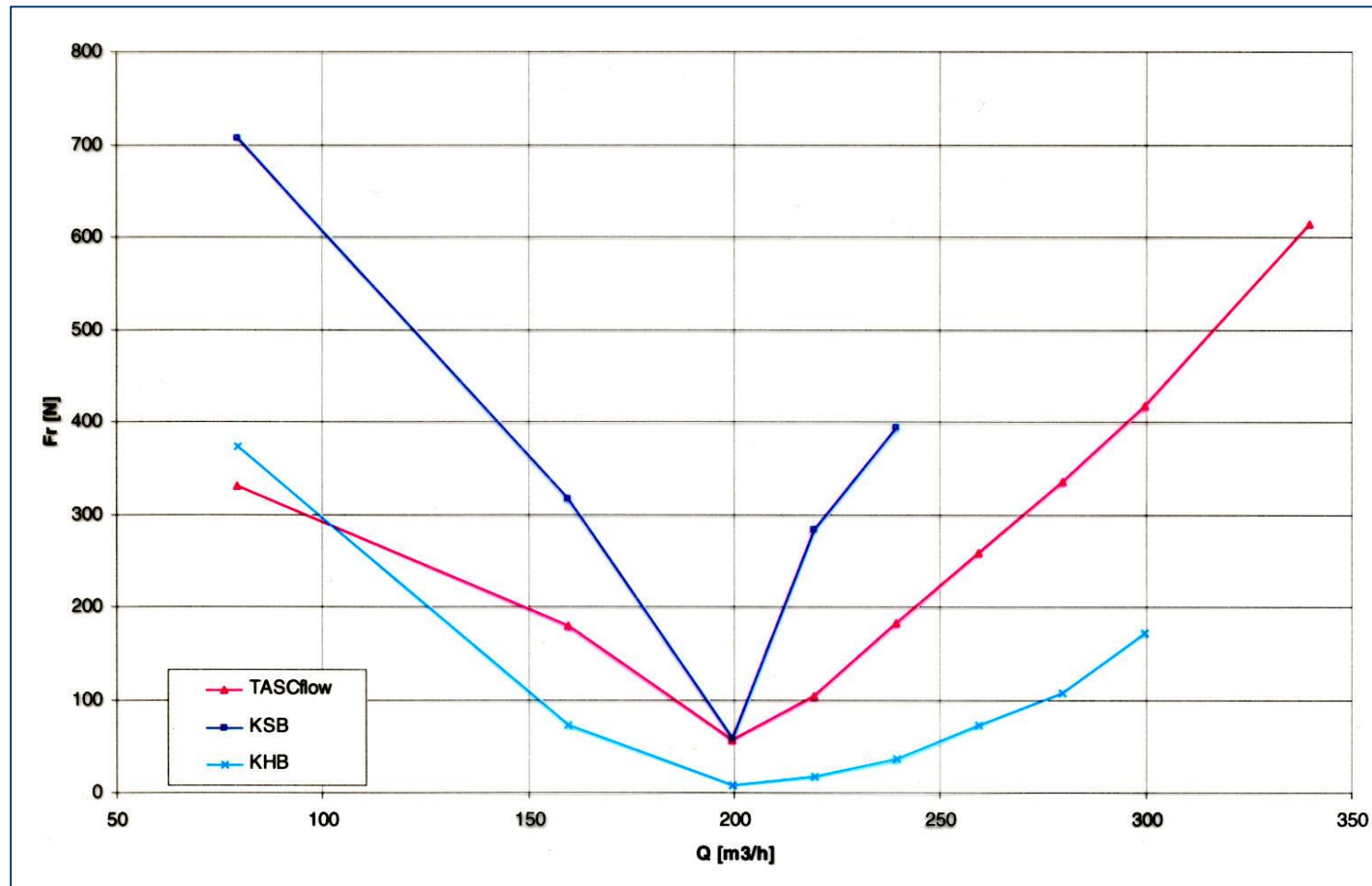
Statische Druckverteilung (BEP)



Druckverteilung

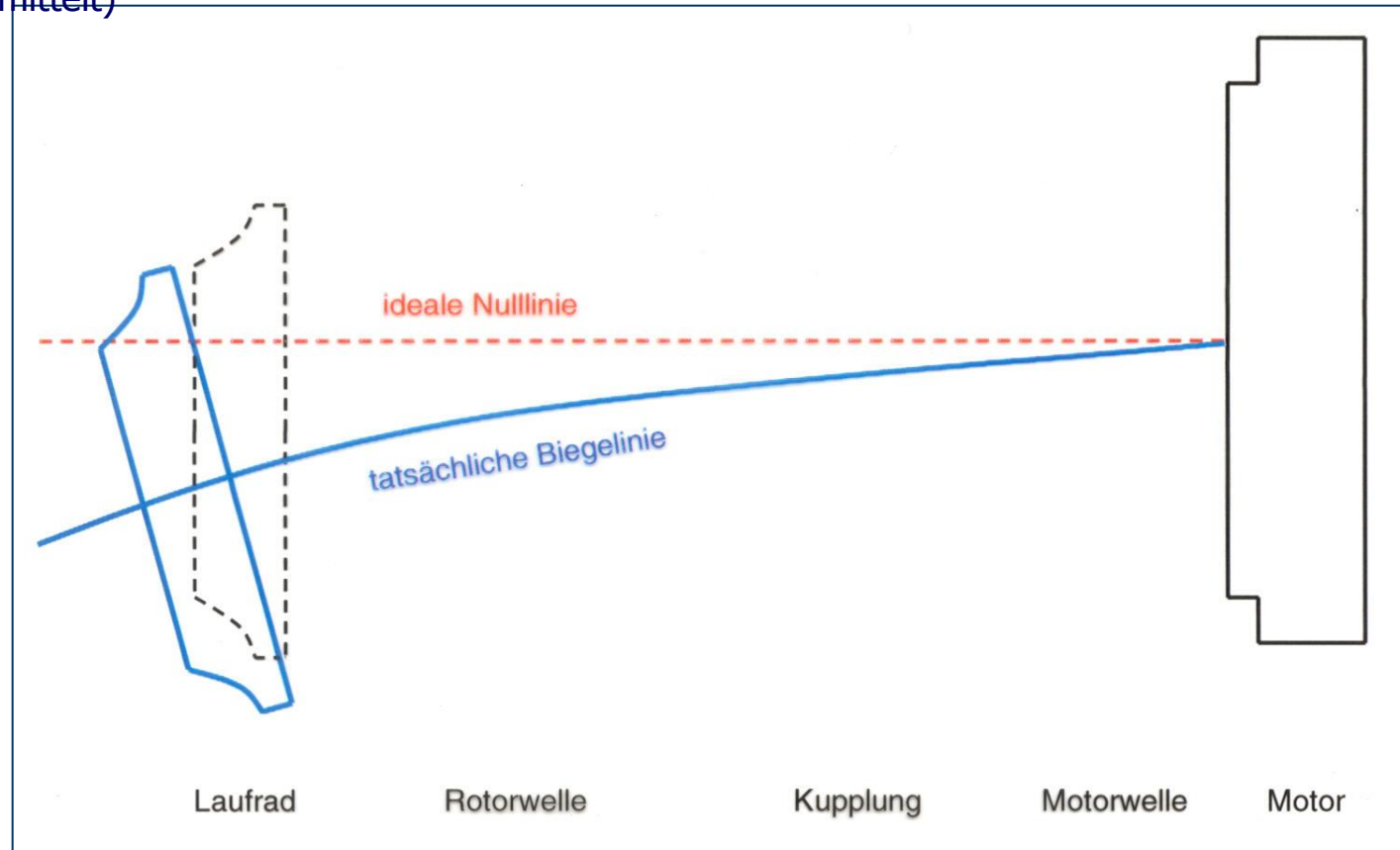


Berechnete Radialkraft



Ø-Versatz infolge Durchbiegung - Wellenstrang -

(Maße noch nicht ermittelt)



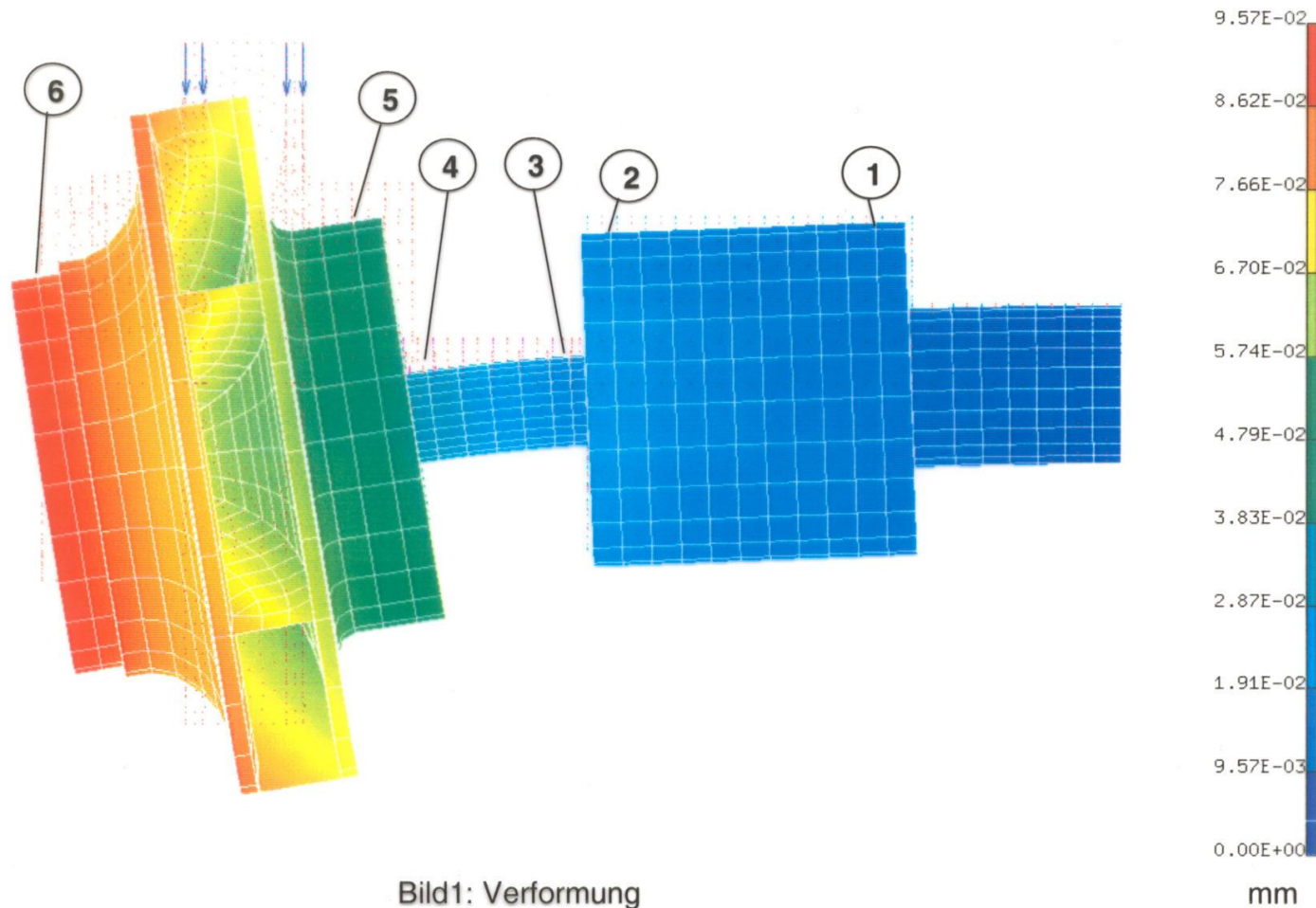


Bild1: Verformung

Lauftradformen – warum?

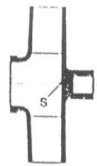


Bild 1: Radialrad mit rein radialen Schaufeln, Stau-
punkt S (Draufsicht ohne vordere
Deckscheibe dargestellt)

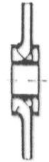


Bild 2: Radialrad mit Schaufeln, die sich bis in den
Saugmund erstrecken (Draufsicht ohne vordere
Deckscheibe dargestellt)

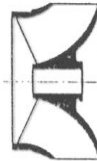


Bild 3: Halbbaxialrad (Schraubenrad, Diagonalrad)
(Draufsicht ohne vordere Deckscheibe dargestellt)

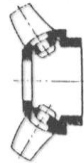


Bild 4: Halbbaxialrad (halbbaxialer Propeller)



Bild 5: Axialrad (axialer Propeller)



Bild 6: Zur Unterscheidung von geschlossenen und
offenen, 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

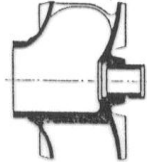


Bild 7: Geschlossenes Einschufelrad (Draufsicht ohne
Deckscheibe dargestellt)

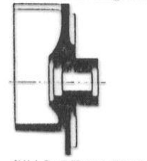


Bild 8: Offenes Einschufelrad

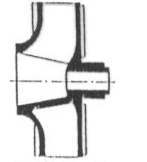


Bild 9: Geschlossenes Einkanalrad (Draufsicht ohne
Deckscheibe dargestellt)

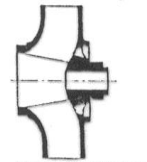


Bild 10: Geschlossenes Zweikanalrad (Draufsicht ohne
Deckscheibe dargestellt)

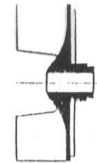


Bild 11: Offenes Zweikanalrad mit S-förmigen Schau-
feln



Bild 12: Geschlossenes Dreikanalrad (Draufsicht ohne
Deckscheibe dargestellt)



Bild 13: Offenes Dreikanalrad mit zylindrischen Schau-
feln

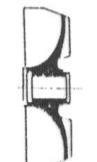
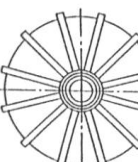


Bild 14: Freistromrad



Bild 15: Peripherialrad



Quelle: KSB Kreislumpenlexikon

Konstruktion von

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

Ausblick nächste Vorlesung

- ▶ Entwurf Leitrad und Gehäuse
- ▶ Verluste und Wirkungsgrade
- ▶ Kennlinien