



Auslegungs- und Berechnungsverfahren für Pumpen

Dr. Gero Kreuzfeld

CFturbo Software & Engineering GmbH
Dresden, München

gero.kreuzfeld@cfturbo.de

Inhalt

| | |
|--|----|
| 1. Entwurfsprozess einer Turbomaschine | |
| ▪ CAE – Computer Aided Engineering | 3 |
| ▪ CFD-Systeme für Turbomaschinen | 4 |
| 2. Maschinendaten | 5 |
| 3. Laufradentwurf | |
| ▪ Hauptabmessungen | 6 |
| ▪ Meridianschnitt | 16 |
| ▪ Schaufelwinkel | 18 |
| ▪ Skelettlinien | 22 |
| ▪ Schaufelprofilierung | 24 |
| 4. Radialdiffusor (beschaufelt) | |
| ▪ Hauptabmessungen | 25 |
| ▪ Eintrittswinkel | 26 |
| ▪ Schaufel | 27 |
| 5. Spiralgehäuse | |
| ▪ Eintritt | 28 |
| ▪ Spirale | 29 |
| ▪ Diffusor | 30 |
| 6. 3D-Modell | 31 |

Bohl, Elmendorf

Strömungsmaschinen, Bd. 1, 2

Fister

Fluidenergiemaschinen, Bd. 1, 2

Pfleiderer, Petermann

Strömungsmaschinen



Raabe

Hydraulische Maschinen und Anlagen

Sigloch

Strömungsmaschinen

Whitfield, Baines

Design of Radial Turbomachines

Gülich

Kreiselpumpen



Holzenberger

Auslegung von Kreiselpumpen

Holzenberger, Jung

Kreiselpumpen Lexikon

Japikse, Marscher, Furst

Centrifugal Pump Design and Performance

Lobanoff, Ross

Centrifugal Pumps: Design & Application

Tuzson

Centrifugal Pump Design

Wagner

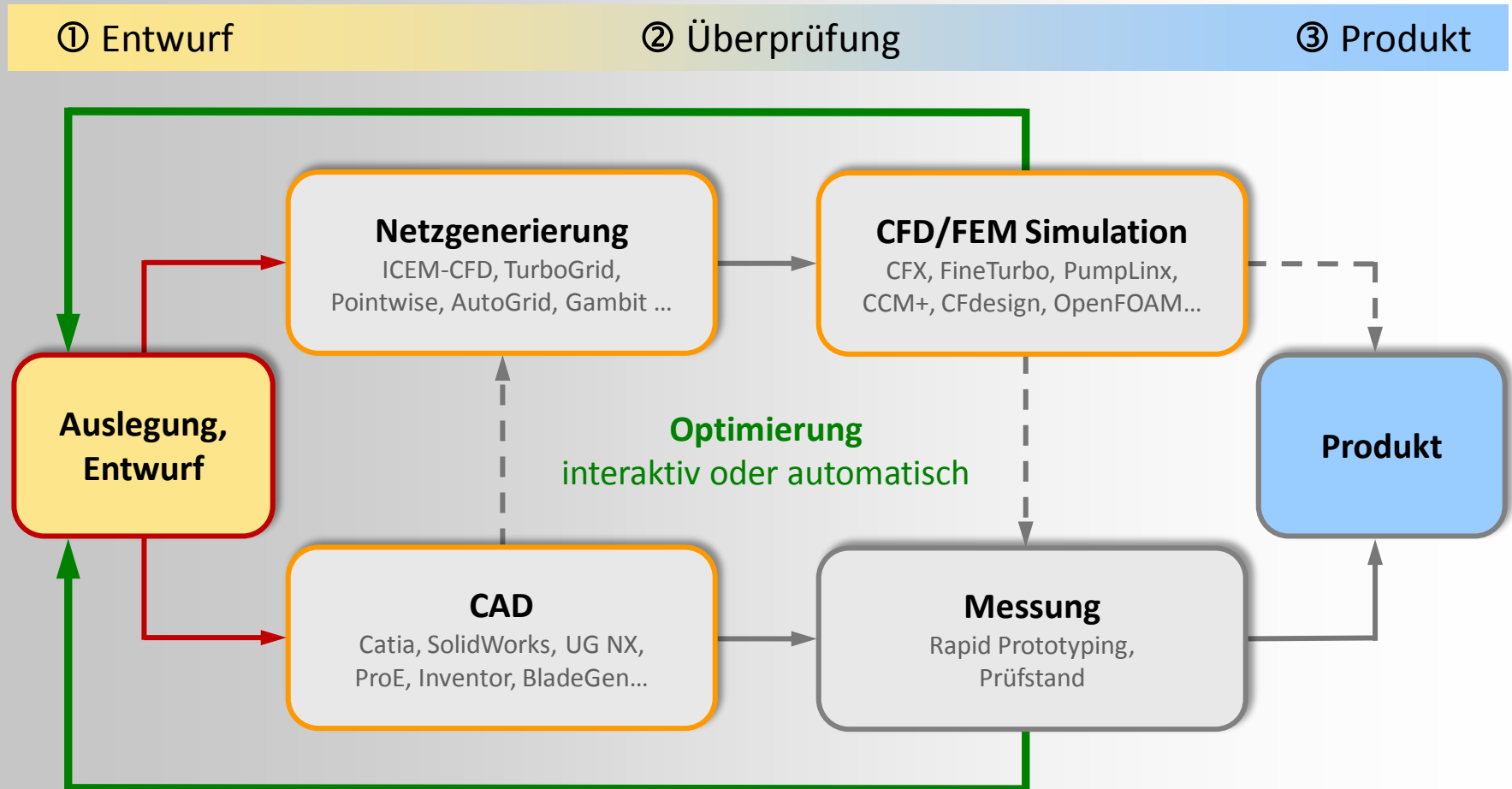
Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen

Will

Kreiselpumpen (Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 5)

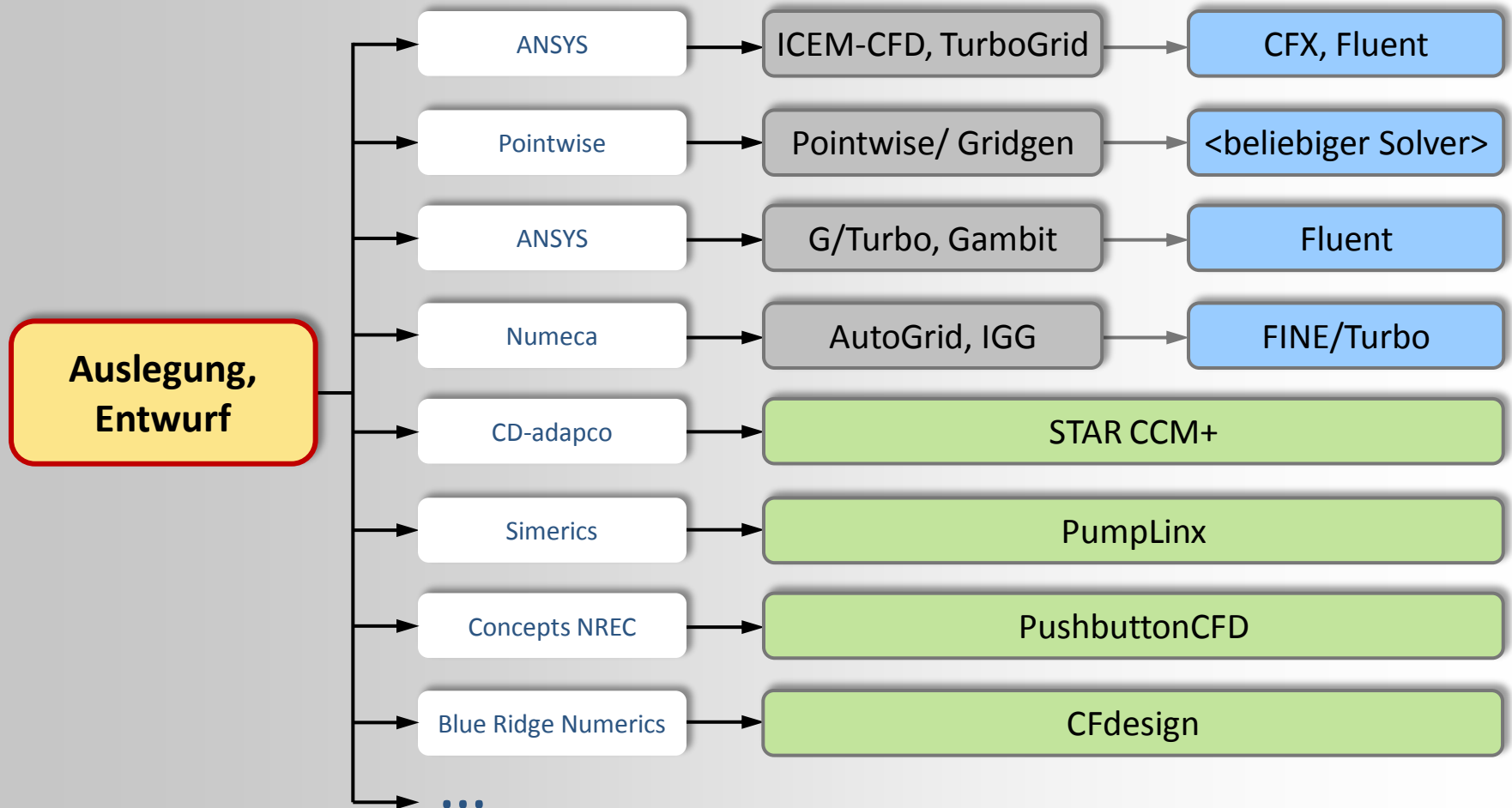
1. Entwurfsprozess einer Turbomaschine

CAE – Computer Aided Engineering



1. Entwurfsprozess einer Turbomaschine

Wichtige CFD-Systeme für Turbomaschinen



2. Maschinendaten

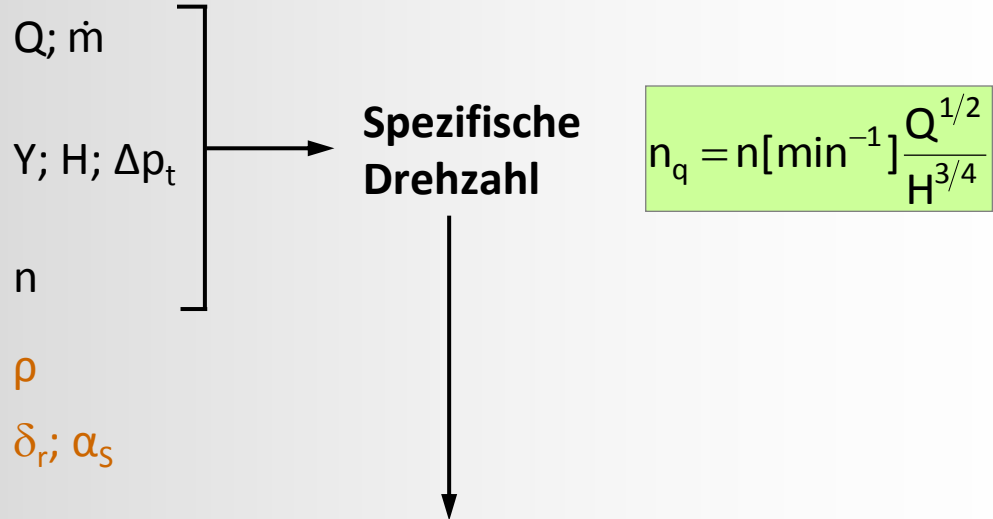
Nennpunkt

- ① Förderstrom
(Volumenstrom; Massestrom)
- ② Energieübertragung
(Arbeit; Förderhöhe; Totaldruckdifferenz)
- ③ Drehzahl

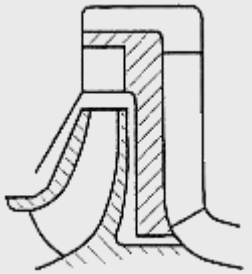
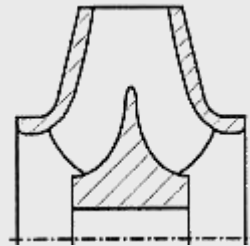



Fluiddichte

Zuström-Drall

(Drallzahl; Strömungswinkel)



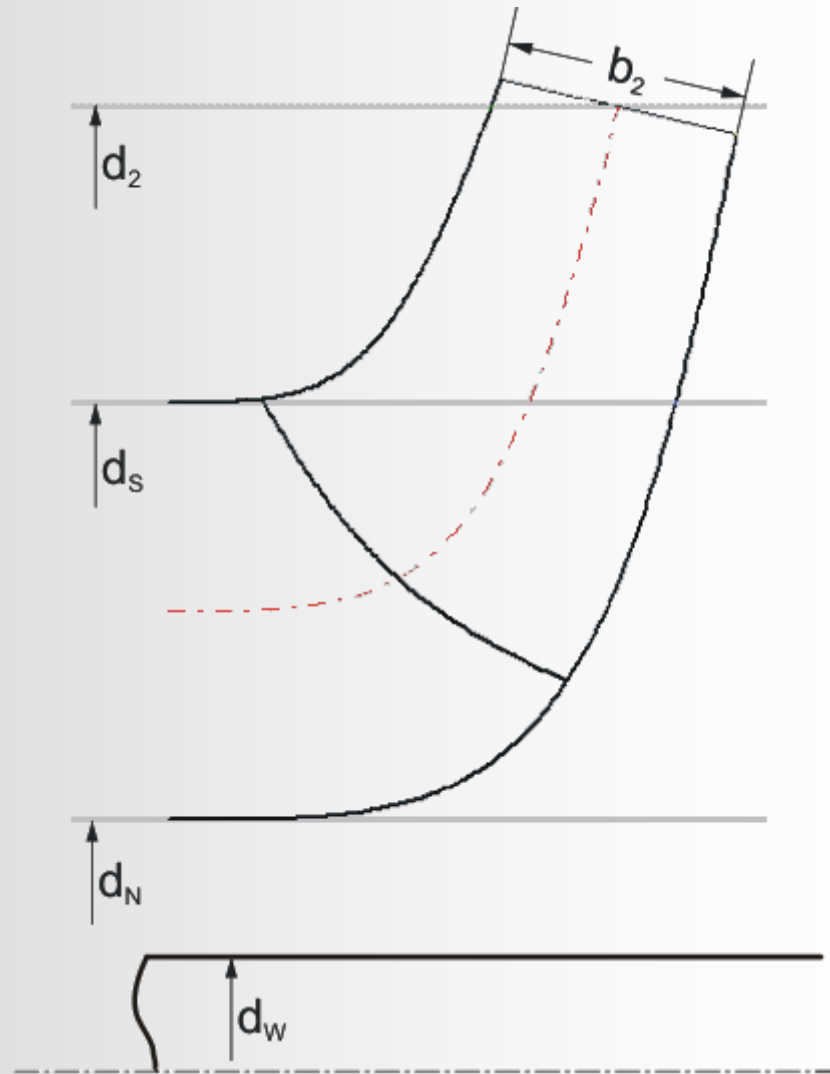
Machinentyp und allgemeine Laufradform:

| | | | | |
|--|---|---|--|--|
| <p>zu niedrige n_q → mehrstufig</p>  | <p>zu hohe n_q → doppelflutig</p>  | | | |
| <p>$n_q = 10 \dots 50$ Radiales Laufrad</p>  | | <p>$50 \dots 150$ Halbaxiales Laufrad</p>  | | <p>$150 \dots 400$ Axiales Laufrad</p>  |

3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen

| | |
|---------------------|-------|
| Wellendurchmesser | d_W |
| Nabendurchmesser | d_N |
| Saugmunddurchmesser | d_S |
| Laufraddurchmesser | d_2 |
| Laufradbreite | b_2 |



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen

Ein Nennpunkt → Laufräder mit unterschiedlichen Hauptabmessungen möglich

↳ Nutzung empirischer Daten für optimale oder erreichbare Werte basierend auf veröffentlichten Messergebnissen

| | | | |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|------------------------|
| • Druckzahl | ψ | • Saugzahl | n_{SS} |
| • Durchmesserzahl | δ | • Einlaufzahl | ε |
| • Lieferzahl | φ | • Strömungswinkel Eintritt | β_{0A} |
| • Breitenzahl | b_2/d_2 | • Strömungswinkel Austritt | β_3 |
| • Hydraulischer Wirkungsgrad | η_h | • Saugkoeffizienten | λ_c, λ_w |
| • Volumetrischer Wirkungsgrad | η_v | • Meridionale Verzögerung | c_{m3}/c_{mS} |
| • Durchmesser Verhältnis | d_s/d_2 | | |

Alternative Berechnungswege für alle Hauptabmessungen möglich, je nach:

- Zielgrößen der Auslegung (Wirkungsgrad, Kennliniensteilheit, Saugfähigkeit, ...)
- Erfahrung des Bearbeiters

3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_2

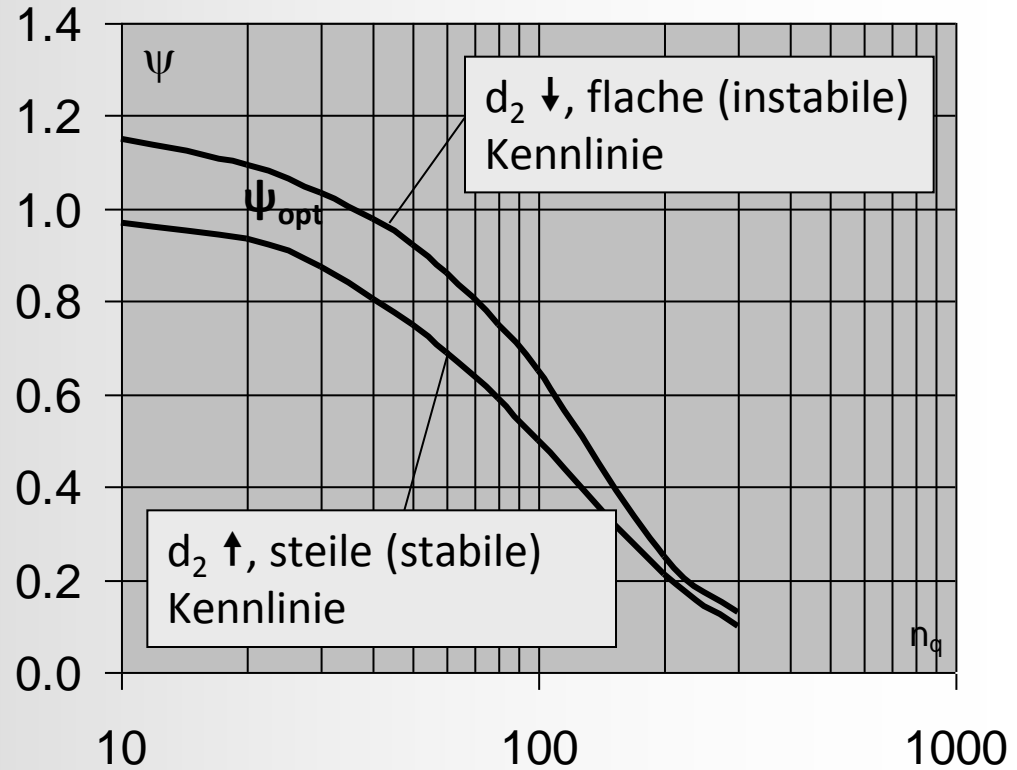
(1a) d_2 mit Druckzahl ψ

$$\psi = \frac{gH}{u_2^2/2}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{2gH}{\pi^2 n^2 \psi}}$$

| ψ | Laufradtyp |
|------------|------------|
| 0.7 ...1.3 | Radial |
| 0.25...0.7 | Halbaxial |
| 0.1 ...0.4 | Axial |

\downarrow
 $n_q \uparrow$
 zentrifugaler Teil von $H \downarrow$



- $n_q < 20$: große ψ für kleine d_2 (Radseitenreibung $\sim d_2^5$!)
- große n_q : kleine ψ für größerer $d_2 \rightarrow$ kleineres b_2 (gleichmäßigere Strömung)

3. Laufrad-Entwurf

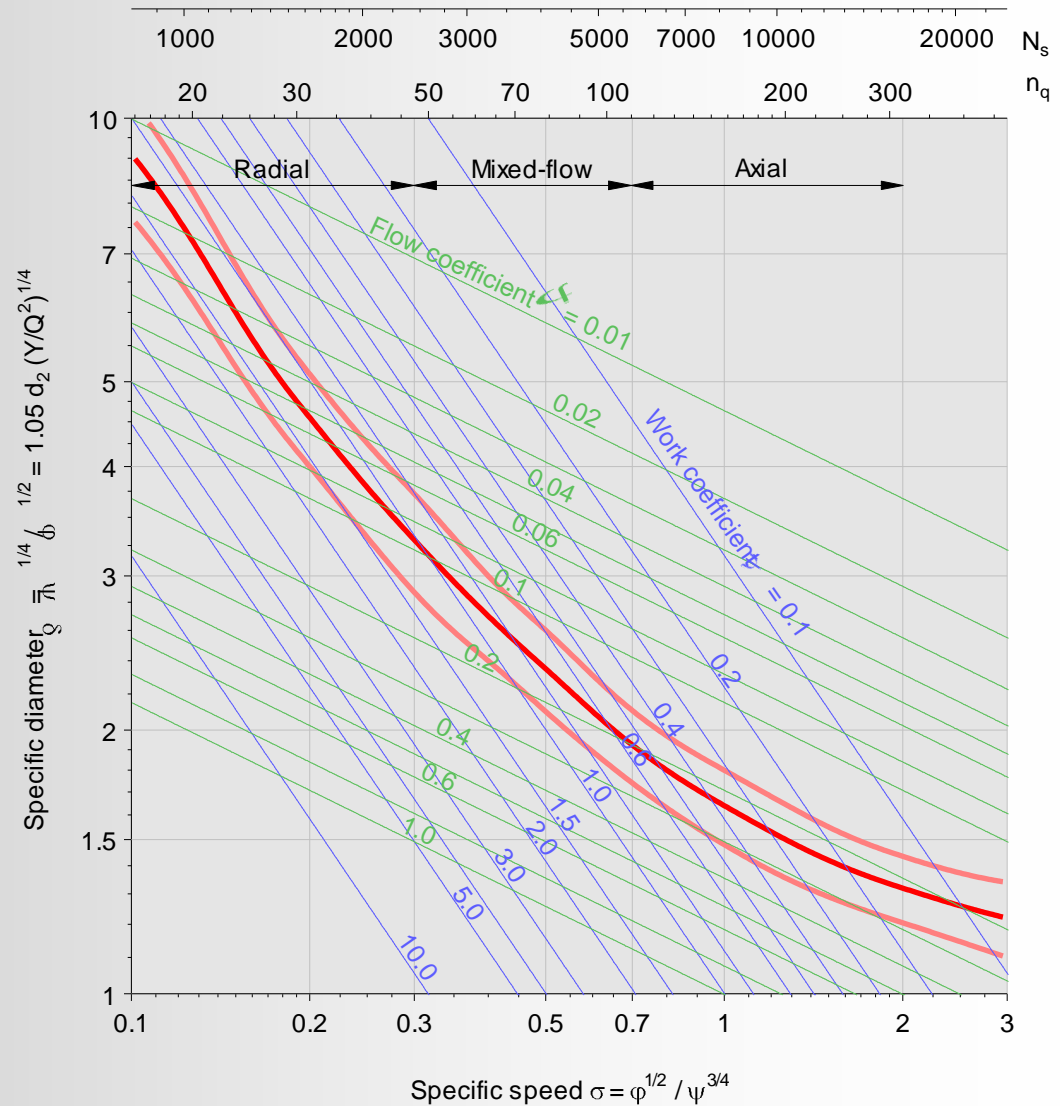
Hauptabmessungen – d_2

(1b) d_2 mit Durchmesserzahl δ

$$\delta = \frac{\psi^{1/4}}{\phi^{1/2}} = 1.05 d_2 \left(\frac{Y}{Q^2} \right)^{1/4}$$

$$d_2 = \frac{\delta}{1.05 (gH/Q^2)^{1/4}}$$

Cordier-Diagramm
 optimaler d_2 -Bereich
 für gegebene
 spezifische Drehzahl n_q



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_2

(1c) d_2 mit Strömungswinkel am Austritt β_3

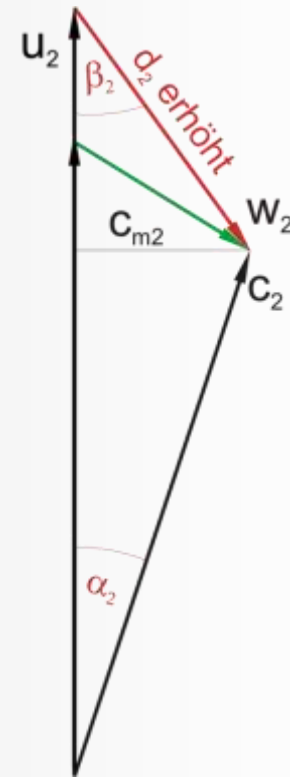
$\beta_3 = 6^\circ \dots 18^\circ$ für stabile Kennlinie

$$d_2 = \frac{\frac{c_{3m}}{2 \tan \beta_3} + \sqrt{\left(\frac{c_{3m}}{2 \tan \beta_3}\right)^2 + (1 - \delta_r) u_1^2} + \frac{gH}{\eta_h \eta_T}}{\pi n}$$

d_2 und β_2 sind über Eulergleichung gekoppelt:

$$d_2 \uparrow \Rightarrow \beta_2 \downarrow$$

$$d_2 \downarrow \Rightarrow \beta_2 \uparrow$$



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – b_2

(2a) b_2 mit Breitenzahl b_2/d_2

$b_2/d_2 = 0.04 \dots 0.30$ (mit n_q steigend)

$$b_2 = (b_2/d_2)d_2$$

(2b) b_2 mit Meridionaler Verzögerung c_{m3}/c_{mS}

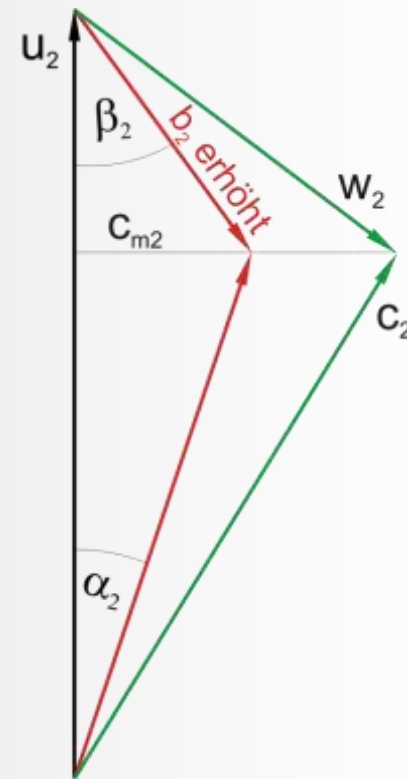
$c_{m3}/c_{mS} = 0.60 \dots 0.95$ (mit n_q steigend)

$$b_2 = \frac{d_S^2 - d_N^2}{4(c_{m3}/c_{m0})d_2}$$

b_2 und β_2 sind über Eulergleichung gekoppelt:

$$b_2 \uparrow \Rightarrow \beta_2 \downarrow$$

$$b_2 \downarrow \Rightarrow \beta_2 \uparrow$$



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_s

(3a) d_s für minimale Relativgeschwindigkeit w

- geringe Reibungs- und Stoßverluste
- nur wenn keine Kavitationsgefahr besteht

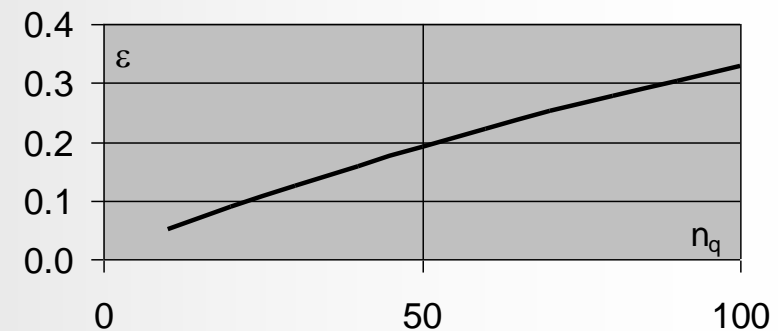
$$\frac{\partial w_1}{\partial d_s} = 0 \quad \longrightarrow \quad d_s = d_2 f \sqrt{\left(\frac{d_N}{d_2}\right)^2 + 1.5 \cdot 10^{-3} \psi \frac{n_q^{1.33}}{\delta_r^{0.67}}}$$

$$f = \begin{cases} 1.15 \dots 1.05 & \text{Standardlaufrad, } n_q = 15 \dots 40 \\ 1.25 \dots 1.15 & \text{Sauglaufrad} \end{cases}$$

(3b) d_s mit Einlaufzahl ε

$$\varepsilon = \frac{c_0}{\sqrt{2Y}} \sim \beta_{0a}$$

$$d_s = \sqrt{d_N^2 + \frac{4Q}{\pi \eta_v \sqrt{\varepsilon^2 2Y - (1 - \delta_r)^2 \pi^2 d_s^2 n^2}}}$$



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_s

(3c) d_s mit Strömungswinkel am Eintritt β_{0a}

- große β_{0a} → weniger Reibungsverluste, höherer Wirkungsgrad, kleinere d_s
- kleinere $\beta_{0a} < 20^\circ$ → geringeres Kavitation-Risiko, größere d_s
- $\beta_{0a} \approx 12^\circ \dots 17^\circ$

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{4Q}{\pi^2 \eta_v [1 - (d_N/d_s)^2] n \delta_{rA} \tan \beta_{0a}}}$$

(3d) d_s mit minimalem $NPSH_R$

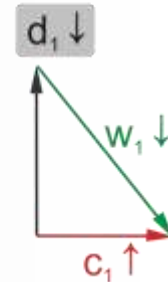
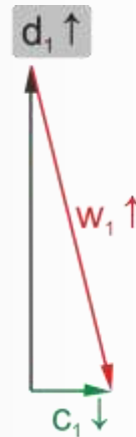
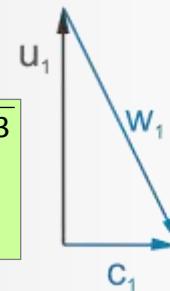
$$NPSH_R = \lambda_c \frac{c_{1m}^2}{2g} + \lambda_w \frac{w_1^2}{2g}$$

Druckabfall an der Schaufeleintrittskante
 $\lambda_w =$ 0.10...0.30 Standardlaufrad
 0.03...0.06 Vorsatzläufer

Eintrittsbeschleunigung und -verluste
 $\lambda_c =$ 1.1 axiale Einströmung
 1.2...1.35 radiales Einströmgehäuse

$$\frac{\partial NPSH_R}{\partial d_s} = 0 \rightarrow$$

$$d_s = \sqrt{d_N^2 + 10.6 \cdot \left(\frac{Q}{\eta_v n}\right)^{2/3} \left(\frac{\lambda_c + \lambda_w}{\lambda_w}\right)^{1/3}}$$



3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_s

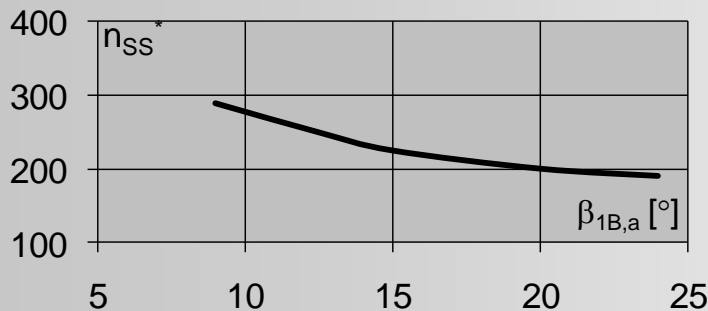
(3e) d_s mit Saugzahl n_{SS}

$$n_{SS} = n \left[\text{min}^{-1} \right] \cdot \frac{\sqrt{Q \left[\text{m}^3/\text{s} \right]}}{\left(\text{NPSH}_R \left[\text{m} \right] \right)^{3/4}}$$

- Analog zur spezifischen Drehzahl n_q
- Charakteristisch für Saugfähigkeit
- normalisierte Saugzahl:

$$n_{SS}^* = \frac{n_{SS}}{\sqrt{k_n}} \left(\frac{n_{q,ref}}{n_q} \right)^{0.19} \quad (n_{q,ref} = 27)$$

- $\beta_{1B,a} = f(n_{SS}^*)$



| Einsatzbereich | $u_1 \text{ (m/s)}$ | n_{SS} |
|-----------------------------------|---------------------|-----------|
| Standard Saugräder | < 50 | 160...220 |
| Saugräder, axiale Zuströmung | < 35 | 220...280 |
| Saugräder mit durchgehender Welle | < 50 | 180...240 |
| Hochdruckpumpe | > 50 | 160...190 |
| Vorsatzläufer für ind. Anwendung | < 35 (45) | 400...700 |
| Vorsatzläufer für Raketentechnik | | > 1000 |

$$d_s = 2.9 \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{\eta_V n k_n \tan \beta_{1B,a}} \left(1 + \frac{\tan \beta_{1B,a}}{\tan \alpha_1} \right)}$$

mit Tragscheiben-
versperrung $k_n = \sqrt{\left(1 - \frac{d_N^2}{d_s^2} \right)}$

3. Laufrad-Entwurf

Hauptabmessungen – d_s

(3f) d_s mit Durchmesser Verhältnis d_s/d_2

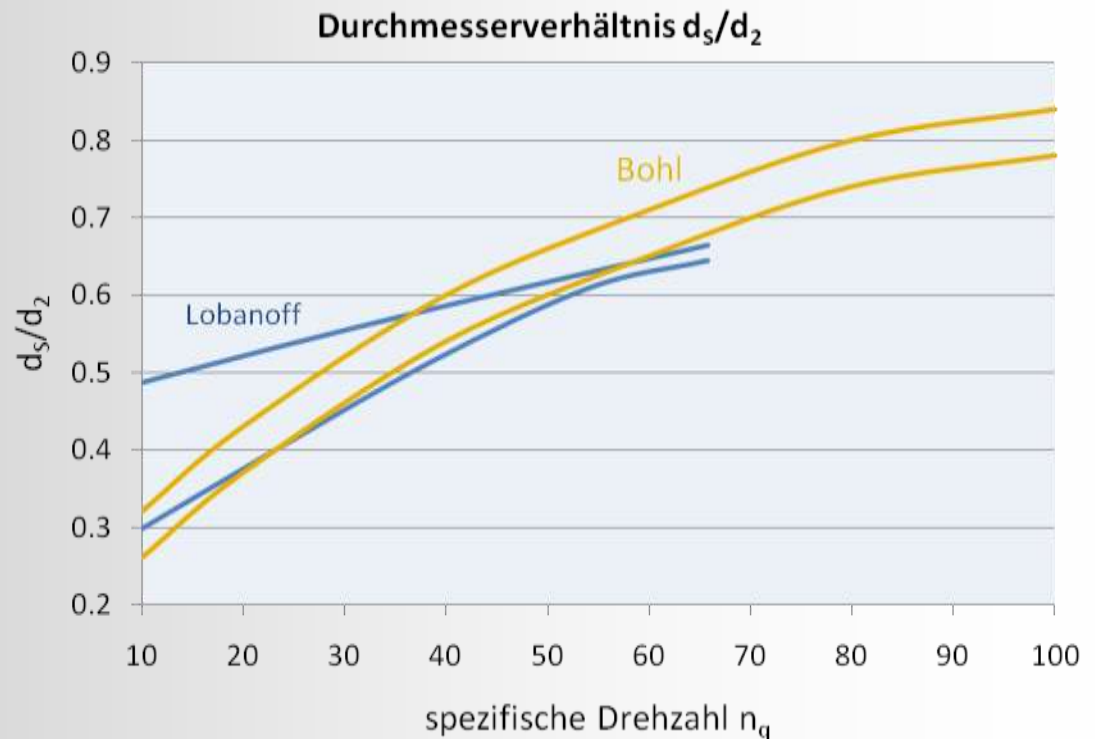
$$d_s = (d_s/d_2)d_2$$

Spielraum vor allem bei kleinen n_q wegen unterschiedlichen Kriterien:

Wirkungsgrad



Saugfähigkeit



3. Laufrad-Entwurf

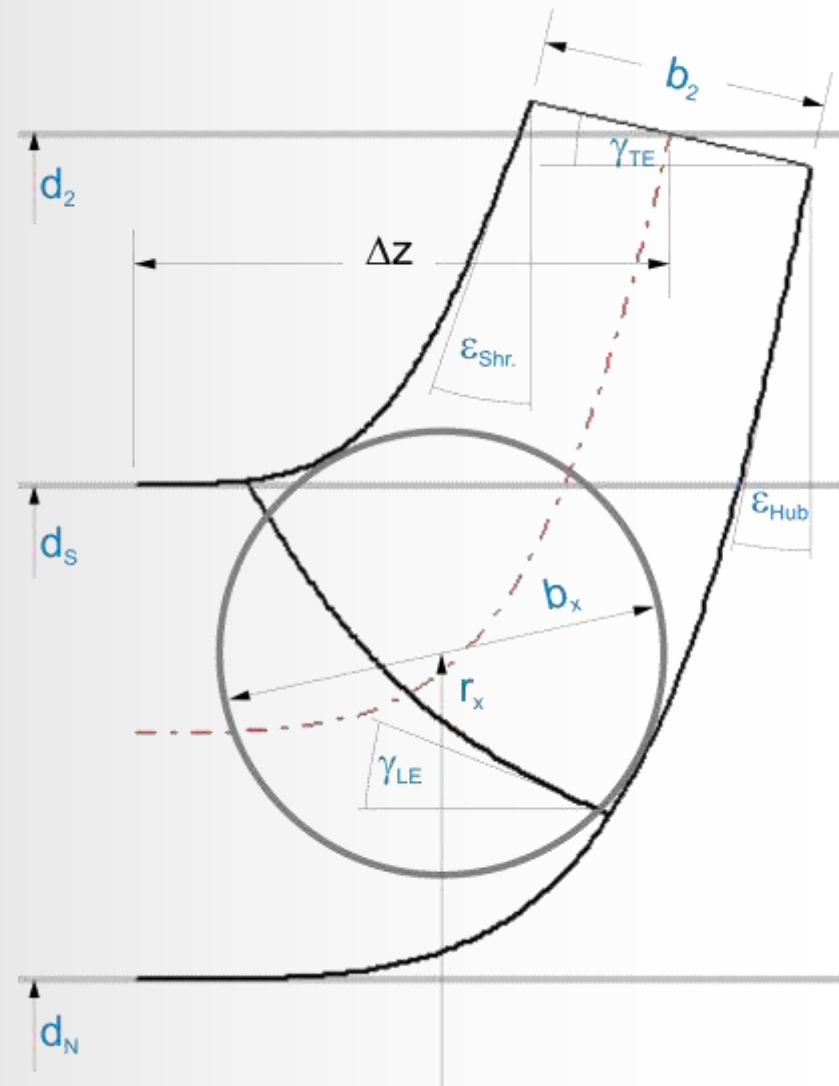
Meridianschnitt

- Hauptabmessungen als Randbedingung:
 d_N, d_s, d_2, b_2
- Axiale Erstreckung Δz
$$\Delta z = (d_{2a} - d_s) \left(n_q / 74 \right)^{1.07} + b_2 / 2 \cos \gamma$$
- Neigungswinkel ε von Trag- und Deckscheibe:

$$\varepsilon_{\text{Shroud}} = \begin{cases} 0^\circ & \text{für } n_q < 20 \\ 15^\circ \dots 20^\circ & \text{für höhere } n_q \end{cases}$$

$$\varepsilon_{\text{Hub}} = 0^\circ \text{ für } n_q < 30 \quad \varepsilon_{\text{Hub}} < \varepsilon_{\text{Shroud}}$$
- Neigungswinkel γ_{TE} der Hinterkante:

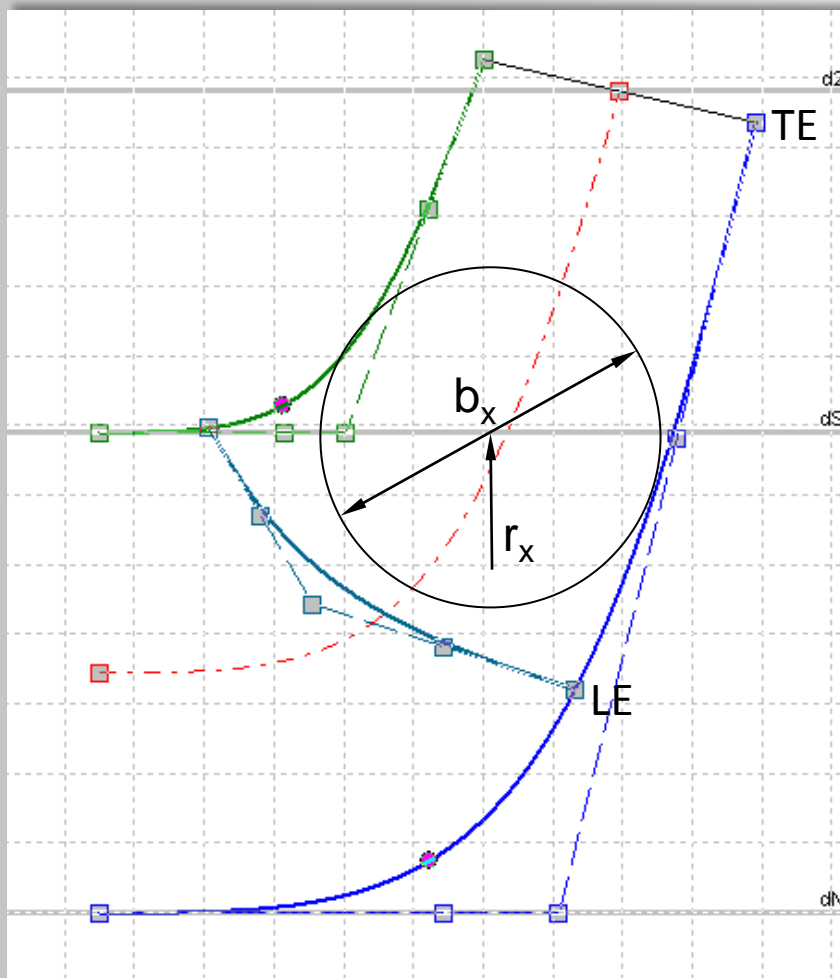
$$\gamma_{\text{TE}} = \begin{cases} 0^\circ & \text{für } n_q < 40 \\ 10^\circ \dots 30^\circ & \text{für höhere } n_q \end{cases}$$
- Neigungswinkel γ_{LE} der Vorderkante:
 $\gamma_{\text{LE}} \approx 30^\circ \dots 40^\circ$
- Winkel zwischen Vorderkante und Deckscheibe:
so groß wie möglich für geringe Versperrung



3. Laufrad-Entwurf

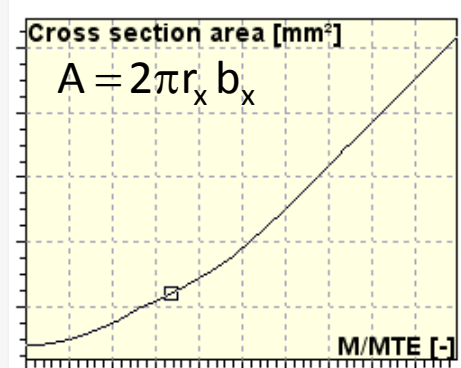
Meridianschnitt

Meridiangeometrie z.B. als Bezierkurven

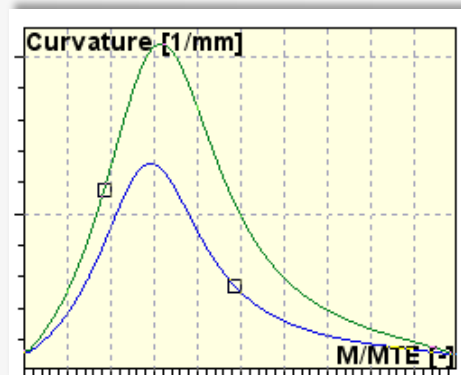


Überprüfung der Verteilung von

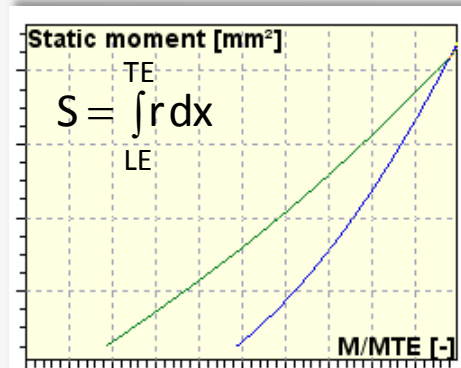
a) Querschnittsfläche



b) Krümmung



c) statisches Moment



3. Laufrad-Entwurf

Schaufelwinkel – β_1

- Konstanter Drall zwischen Saugmund und Eintrittskante (Energieübertragung nur im Schaufelbereich)
- Versperrung des Strömungskanals durch die Schaufeln im Querschnitt 1:

$$\tau_1 = \frac{t_1}{t_1 - \sigma_1} \quad \text{mit} \quad t_1 = \frac{\pi d_1}{z}, \quad \sigma_1 = \frac{s_1}{\sin \beta_{1B} \sin \lambda_1}$$

- Differenz zwischen gewähltem Schaufelwinkel β_{1B} und Strömungswinkel $\beta_1 =$ Incidence-Winkel: $i = \beta_{1B} - \beta_1$

$i=0$: Standard, stoßfreie Anströmung der Schaufeln

$i>0$: $\beta_1 < \beta_{1B} \Rightarrow$ Staupunkt auf der Schaufel-Druckseite

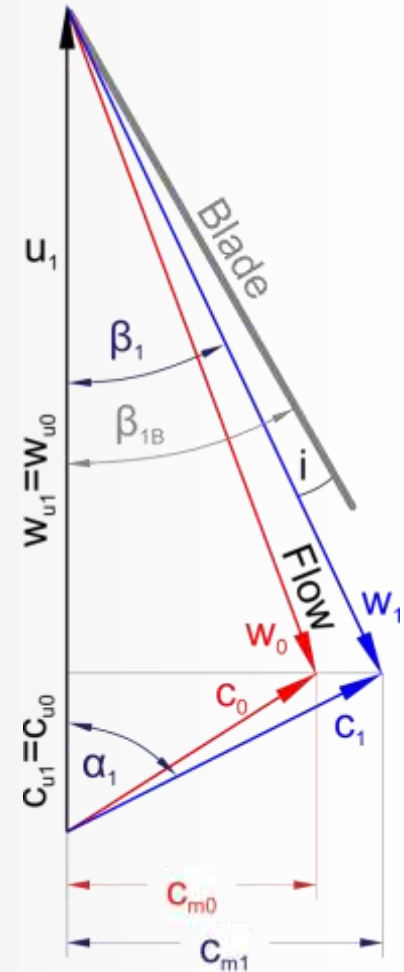
$i<0$: $\beta_1 > \beta_{1B} \Rightarrow$ Schaufel-Saugseite

- Radius der Vorderkante unterschiedlich zwischen Trag- und Deckscheibe:

$\hookrightarrow \beta_{1B} \neq \text{konst.}$

(kleinerer Radius an Tragscheibe \rightarrow großer Winkel $\beta_{1B, \text{Hub}}$)

\rightarrow verwundene Schaufel an der Vorderkante)



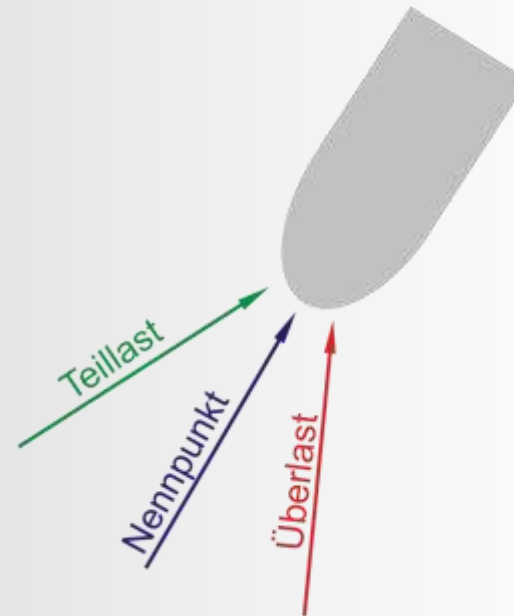
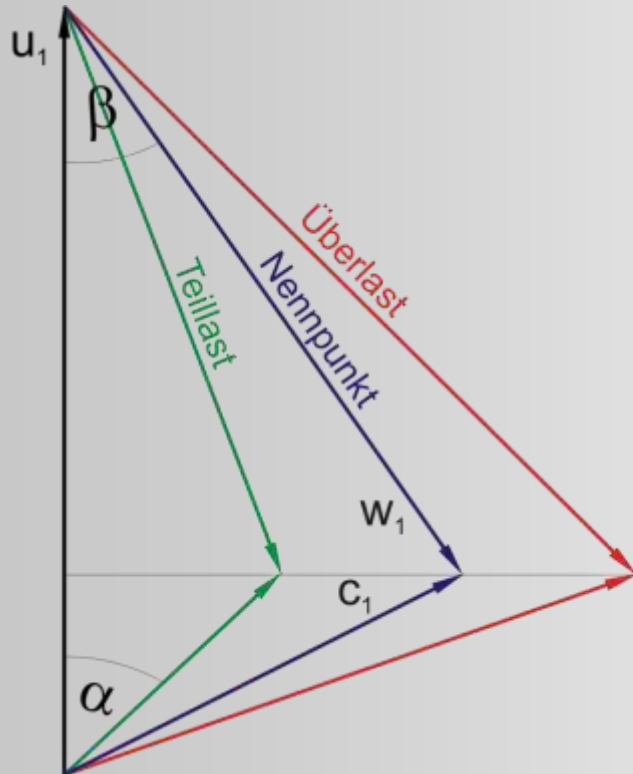
3. Laufrad-Entwurf

Schaufelwinkel – β_1

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{Q/(\pi d_1 b_1) \tau_1}{\pi d_1 n - u_s(1 - \delta_r) r_s / r_1}\right)$$

$$\beta_{1B} = \beta_1 + i$$

β_{1B} sollte so klein wie möglich sein (Kavitation), allerdings nicht kleiner als 15...18° (Wirkungsgrad)



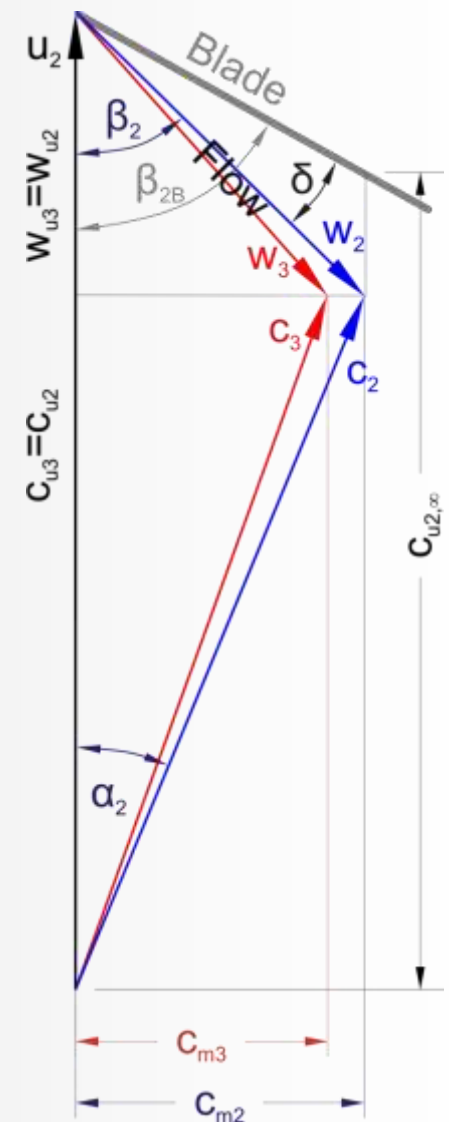
3. Laufrad-Entwurf

Schaufelwinkel – β_2

- β_{2B} beeinflusst stark die Energieübertragung im Laufrad (Eulergleichung der Turbomaschinen)
- Versperrung des Strömungskanals durch die Schaufeln im Querschnitt 2:

$$\tau_2 = \frac{t_2}{t_2 - \sigma_2} \quad \text{mit} \quad t_2 = \frac{\pi d_2}{z}, \quad \sigma_2 = \frac{s_2}{\sin \beta_{2B} \sin \lambda_2}$$

- Radialrad mit niedrigem n_q : $\beta_{2B} = \text{konst.}$
↳ unverwundene Hinterkante
- $w_2/w_1 \geq 0.7$ (de Haller Kriterium)
↳ verhindert Strömungsablösung und damit Wirkungsgrad-Verringerung



3. Laufrad-Entwurf

Schaufelwinkel – β_2

$$\beta_2 = \arctan \left(\frac{Q / \eta_V / (\pi d_2 b_2) \tau_2}{\pi d_2 n - (Y / (\eta_h \eta_T) + u_1^2 (1 - \delta_r)) / (\pi d_2 n)} \right)$$

$$\beta_{2B} = \beta_2 + \delta$$

β_{2B} gewöhnlich im Bereich von $15^\circ \dots 45^\circ$,
oft benutzte Werte: $20^\circ \dots 30^\circ$

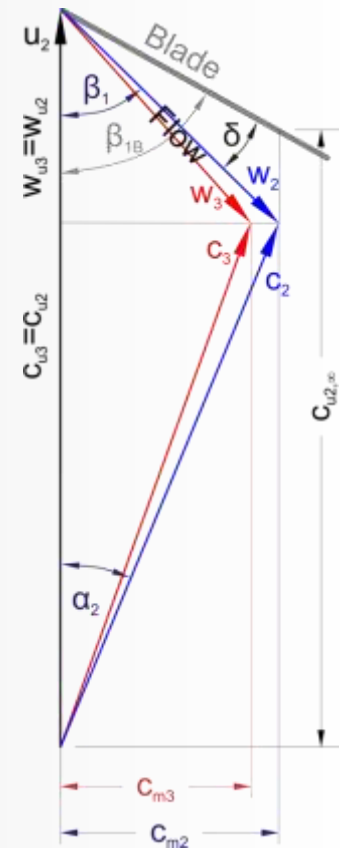
Minderumlenkung

Abweichung zwischen Strömungswinkel β_2 und
Schaufelwinkel: Minderumlenkung $\delta = \beta_{2B} - \beta_2$

$\delta \leq 10^\circ \dots 14^\circ$ zur Begrenzung erhöhter Turbulenzverluste
durch unsymmetrische Strömungsverteilung

Abschätzung der Minderumlenkung durch empirische Modelle:

- Minderleistungs-Theorie nach PFLEIDERER
(empirisches Modell mit Erfahrungszahl a)
- Abströmbeiwert nach WIESNER/BUSEMANN
(geschlossenes empirisches Modell)

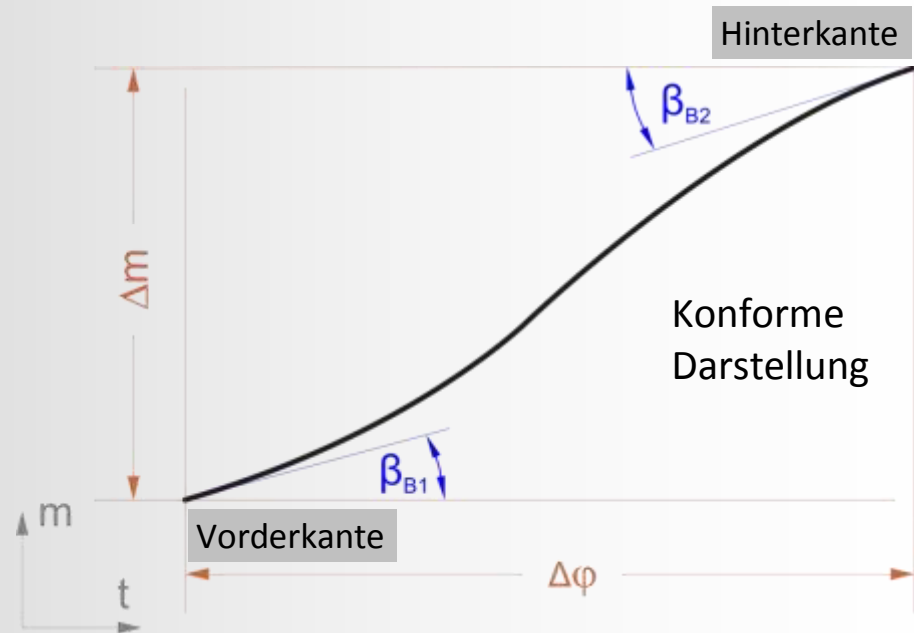


3. Laufrad-Entwurf

Skelettlinien

Geometrische Randbedingungen:

- Schaufelwinkel β_{B1} , β_{B2}
- Meridionale Erstreckung Δm
- Umschlingungswinkel $\Delta\varphi$
(abnehmend mit n_q , Schaufelzahl)
- Zwangsbedingungen durch spezielle Schaufelform, z.B. einfach gekrümmte Schaufeln (Zylinder-, 2D-Schaufeln)



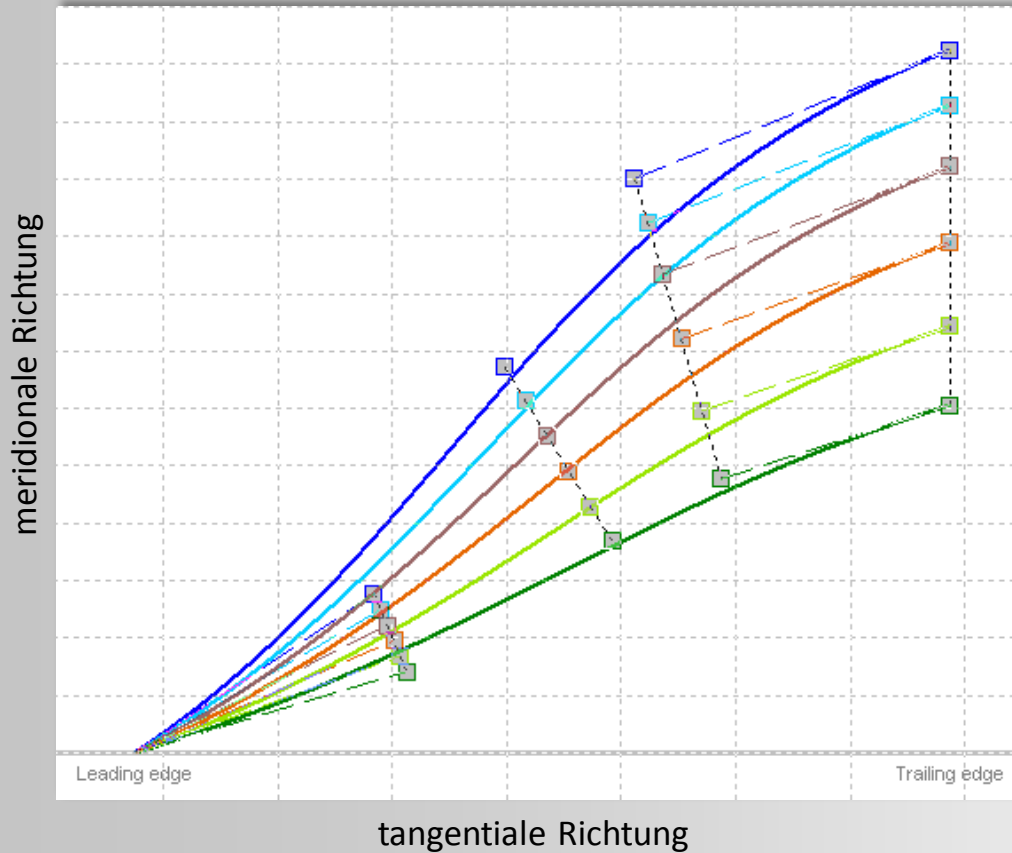
2 alternative Möglichkeiten zum Entwurf der Skelettlinien:

- ➊ β_B -Verteilung vorgeben (z.B. linear) → Umschlingungswinkel φ berechnen
- ➋ Umschlingungswinkel φ vorgeben → β_B -Verteilung berechnen

3. Laufrad-Entwurf

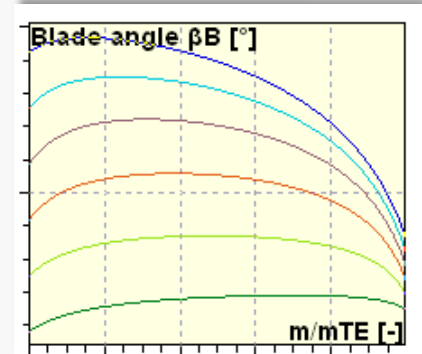
Skelettlinien

Skelettlinien z.B. als Bezierkurven

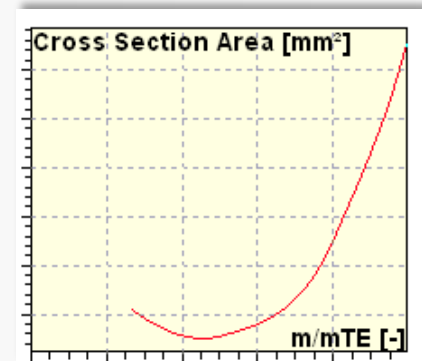


Überprüfung der Verteilung von

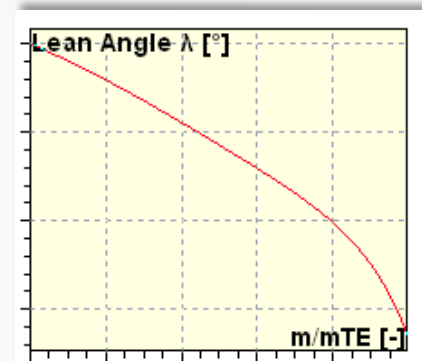
a) Schaufelwinkel



b) Querschnittsfläche



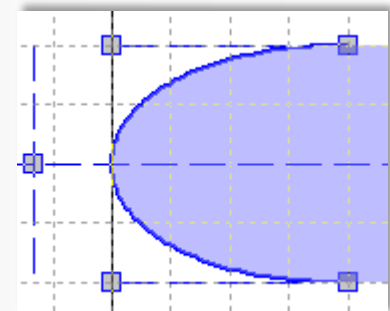
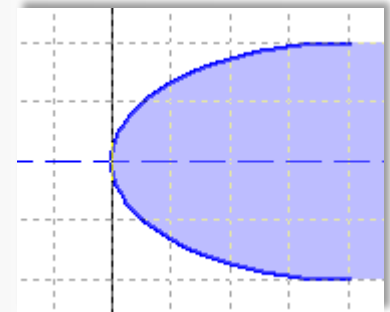
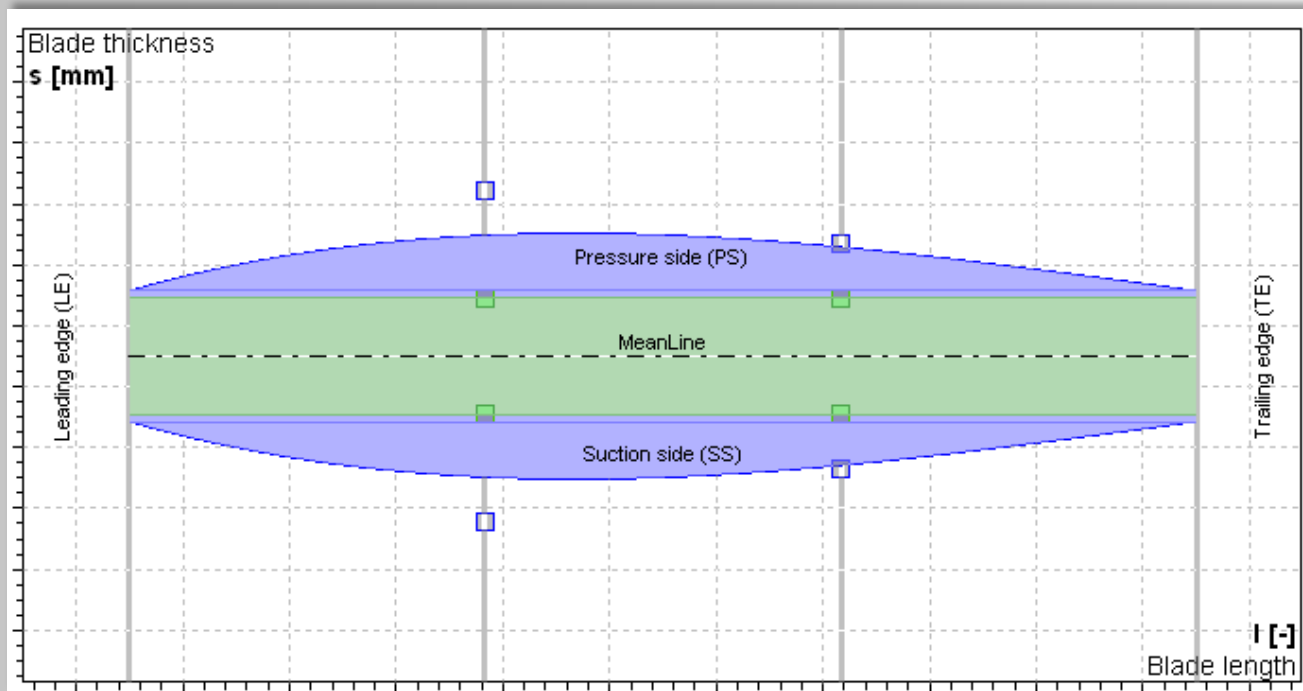
c) Lean angle



3. Laufrad-Entwurf

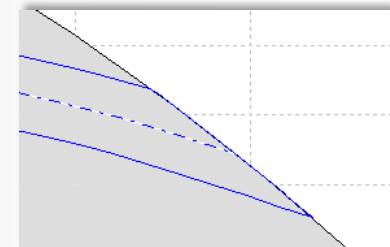
Schaufelprofilierung

Dickenverteilung häufig konstant oder linear;
selten echte Profilierung



Vorderkante
elliptisch oder per
Bezier-Spline

Hinterkante
meist
überdreht



4. Radialdiffusor (beschaufelt)

Hauptabmessungen

- Eintrittsdurchmesser d_3 :

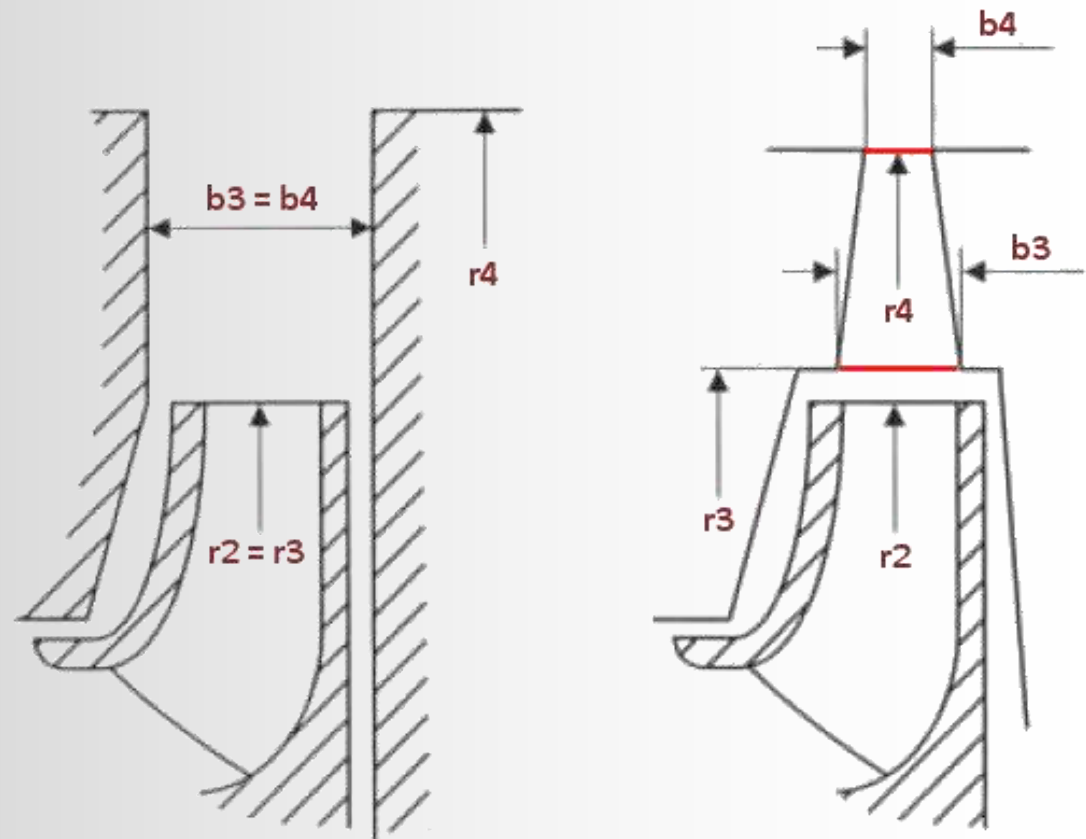
$$\frac{d_3}{d_2} = 1.01 + 0.75 \cdot 10^{-1} \left(\frac{H}{100} - 1 \right)$$

- Eintrittsbreite b_3 :

$$\frac{b_3}{b_2} = 1.05 \dots 1.3$$

- Austrittsdurchmesser d_4 :

$$\frac{d_4}{d_2} = (1.05 \dots 1.15) + 0.01 \cdot n_q$$



4. Radialdiffusor (beschaufelt)

Eintrittswinkel

- Umfangsgeschwindigkeit c_{u3} : $c_{u3} = \frac{d_2}{d_3} c_{u2}$ (Drallsatz)
- Meridiangeschwindigkeit c_{m3} : $c_{m3} = \frac{Q \tau_3}{\pi d_3 b_3}$ (Kontinuität; τ_3 analog Laufrad)
- Strömungswinkel α_3 : $\alpha_3 = \arctan\left(\frac{c_{m3}}{c_{u3}}\right)$
- Schaufelwinkel α_{3B} : $\alpha_{3B} = \alpha_3 + i$ (Anstellwinkel $i \approx \pm 3^\circ$)
- Schaufelzahl unter Berücksichtigung der Interferenz der Druckfelder von Lauf- und Leitrad:

$$m = |v_1 z_1 - v_{II} z_{II}|$$

Laufrad- Leitrad-
Periodizität Periodizität

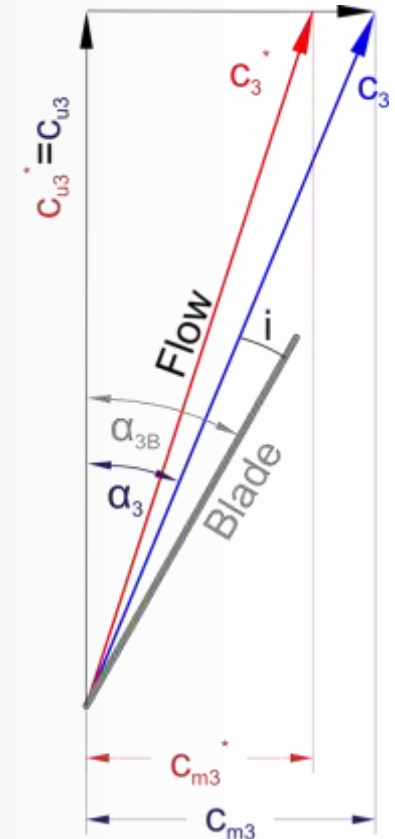
$m=0$: nicht zulässig

$m=1$: nicht zulässig für $v=1$ und $v=2$

$m=2$: vermeiden wenn möglich

v = Ordnung der Schwingung (1, 2, 3)

z = Schaufelzahl



4. Radialdiffusor (beschaufelt)

Schaufel

1. Kreisbogen im Spiralen-Teil

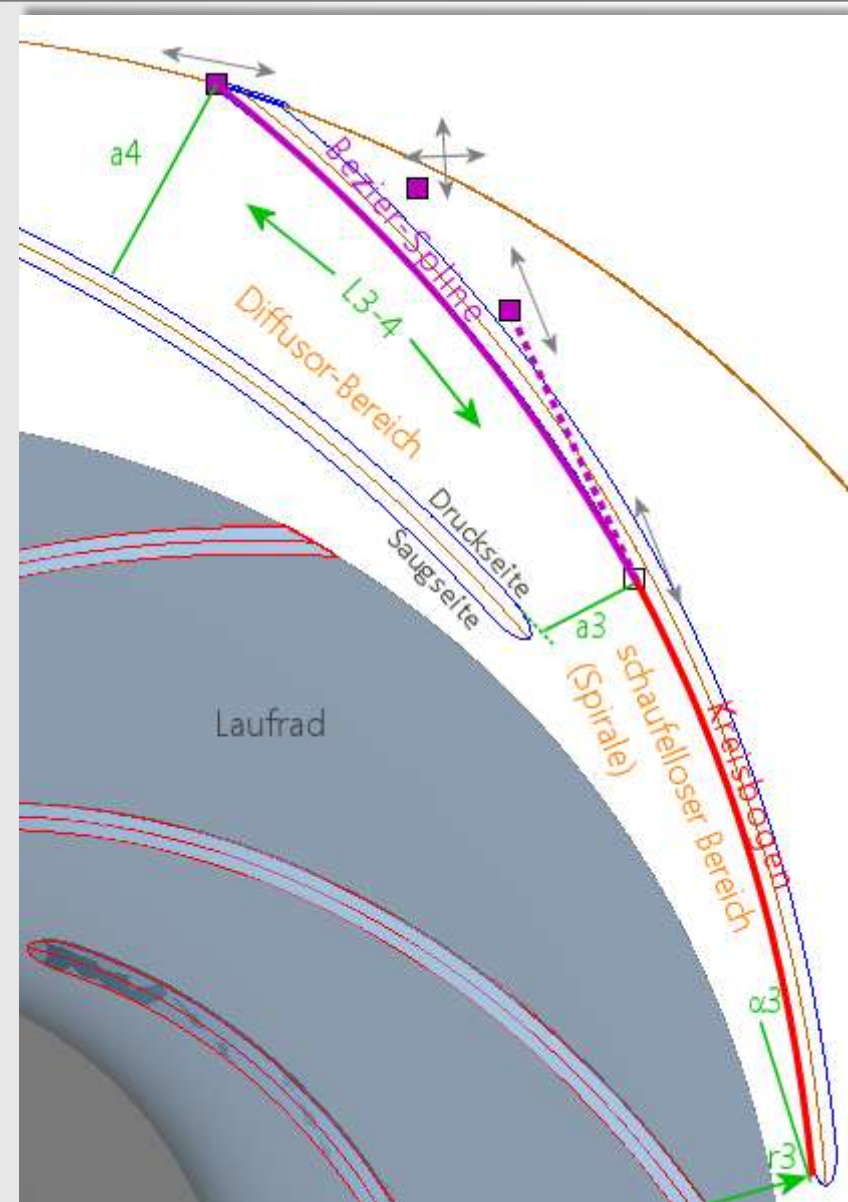
- wirkungsloser Bereich (keine Schaufelüberdeckung) analog Spiralgehäuse
- Randbedingungen: r_3 , α_3 , a_3
- Eintritts-Lichtweite a_3 : Berechnung nach Drallsatz oder Verzögerungsverhältnis

2. Bezier-Spline im Diffusor-Teil

- Diffusor bei Schaufelüberdeckung
- Austritts-Lichtweite a_4 variabel

Diffusorkriterien (Auswahl)

- | | |
|---------------------------|---------------|
| - Flächenverhältnis | A_4/A_3 |
| - Öffnungswinkel | ϑ |
| - Druckrückgewinn-Beiwert | c_p |
| - Diffusor-Wirkungsgrad | η_D |
| - Verzögerungsverhältnis | c_3/c_2 |
| - Länge-Weite-Verhältnis | L_{3-4}/a_3 |
| - Breite-Weite-Verhältnis | b_3/a_3 |



5. Spiralgehäuse

Eintritt

- Eintritts- (Zungen-) durchmesser d_4 :

$$\frac{d_4}{d_2} \geq 1.03 + 0.1 \frac{n_q}{40} + 0.07 \frac{H[m]}{1000}$$

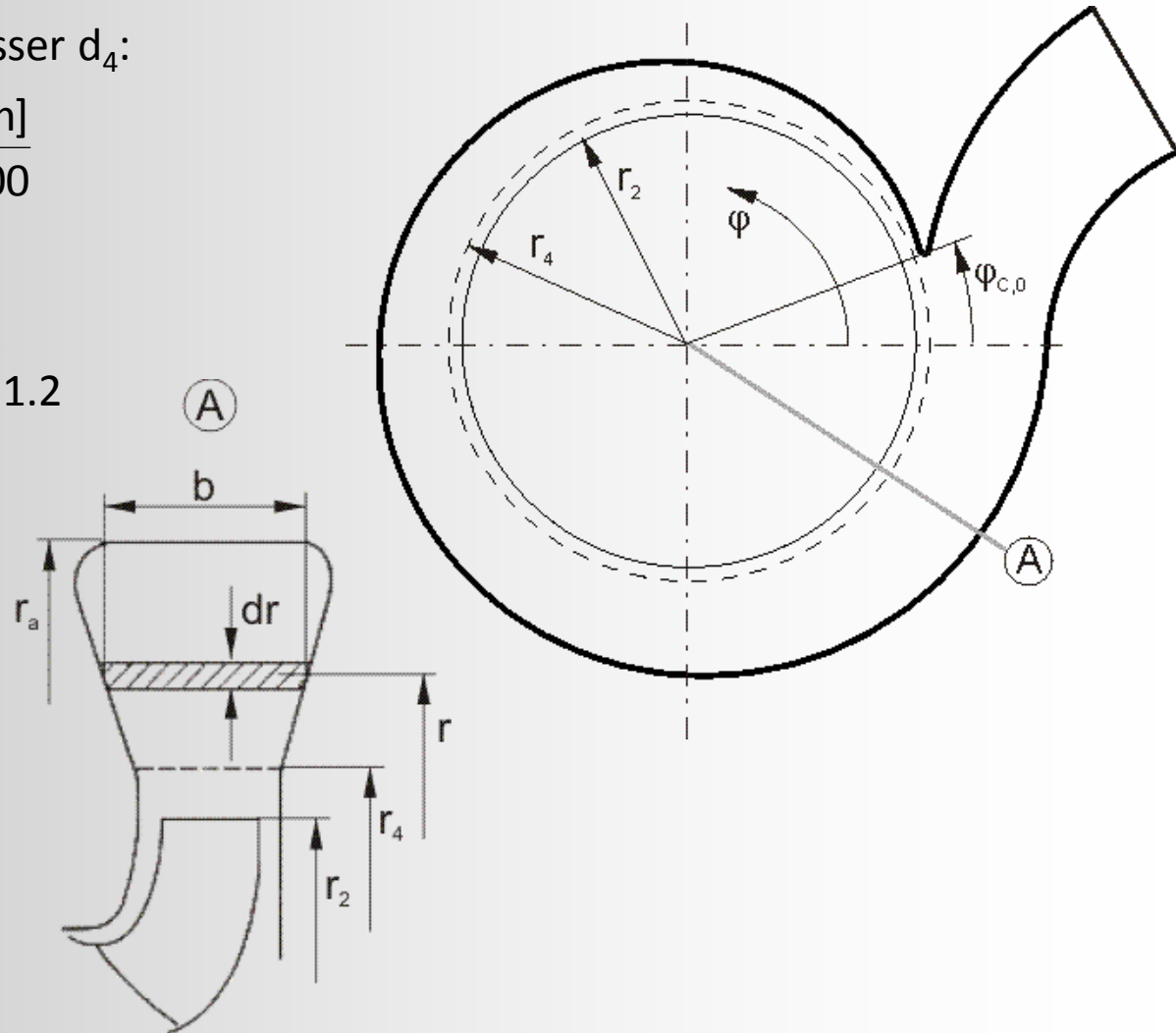
- Eintrittsbreite b_4 :

Radialrad: $b_4/b_2 = 1.2 \dots 2$

Halbaxialrad: $b_4/b_2 = 1.05 \dots 1.2$

- Umfangsgeschwindigkeit am Eintritt (Drallsatz):

$$c_{u4} = \frac{d_2}{d_4} c_{u2}$$



5. Spiralgehäuse

Spirale

Ziel konstanter Druck am Spiralen-Eintritt in Umfangsrichtung
 ⇒ Verhinderung unstetiger Randbedingungen für rotierende Laufrad-Schaufeln

Entwurfsgesetz

Allgemein: $Q_\varphi = \int c_u dA = \int_{r_4}^{r_a(\varphi)} c_u b(r) dr$

→ $\varphi = \frac{2\pi}{Q_{Sp}} \int_{r_4}^{r_a(\varphi)} c_u \cdot b(r) dr$

❶ **Pfleiderer:** konst. Drall $c_u \cdot r = \text{const.}$

konst. Geschwindigkeit $c_u = \text{const.}$

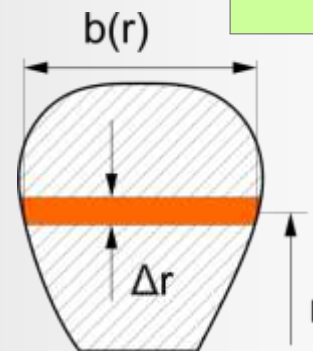
$c_u \cdot r^x = \text{const.}$

→ $\varphi = \frac{2\pi c_{u4} r_4^x}{Q_{Sp}} \int_{r_4}^{r_a(\varphi)} \frac{b(r)}{r^x} dr$

❷ **Stepanoff:** konst. Geschwindigkeit $c_u = k_s \sqrt{2Y}$

$k_s = 0.5 \dots 0.25$
 (abnehmend mit n_q)

→ $\varphi = \frac{2\pi k_s \sqrt{2Y}}{Q_i} \int_{r_4}^{r_a(\varphi)} b(r) dr$



$\int_{r_4}^{r_a(\varphi)} \dots \Delta r$
 (numerisch)

5. Spiralgehäuse

Diffusor

Flächenverhältnis

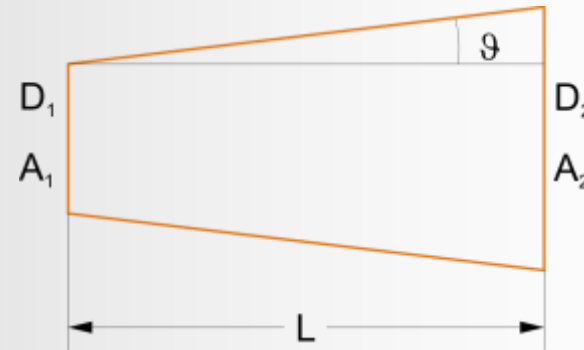
$$A_R = \frac{A_2}{A_1} < 3$$

Öffnungswinkel

$$\vartheta_{\max} \approx 5^\circ$$

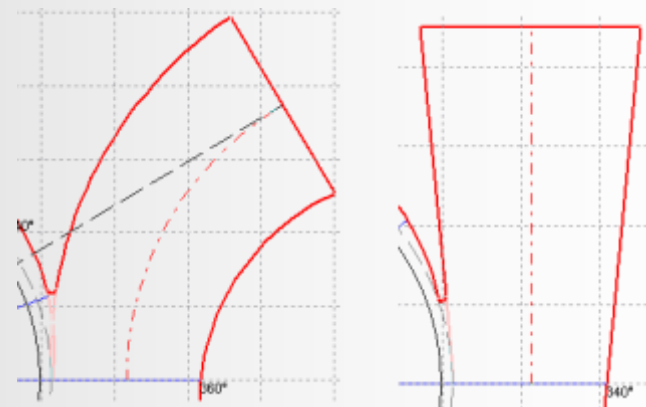
$$\vartheta_{\max} = 16.5^\circ \sqrt{\frac{D_1/2}{L}}$$

$$D_1 = \sqrt{4A_1/\pi} \quad \text{äquivalenter Durchmesser}$$



Form

- Tangential:
kostengünstige Herstellung
- Radial:
Minimierung der Tangentialkräfte



nach dem Entwurf der Pumpe:

- ⇒ CAD-Flächen-/ Solidmodell
- ⇒ CFD-/FEM-Simulation
und/oder Prototyp+Messung
- ⇒ Produkt

