



Wintersemester 2015/2016

Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- ▶ Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)
- ▶ Strömungstechnische Grundlagen (Vorlesung 2)
 - Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
 - Turbulenzmodellierung
 - Grenzen der verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten
- ▶ Kavitation (Vorlesungen 3,4)
- ▶ **Strömungsmaschinen mit Gehäuse (Entwurf, Kennlinien, Regelung)**
(Vorlesung 5,**6**,7,8)
- ▶ Strömungsmaschinen ohne Gehäuse (Entwurf)
(Vorlesung 9)

- ▶ Strömungstechnische Optimierung mit numerischen Methoden (Vorlesung 10)
- ▶ Strömungswandler (Vorlesung 11)
- ▶ spezielle Bauformen – Seitenkanalpumpen, Schraubenspindelpumpen (Vorl. 12)
- ▶ spezielle Bauformen – Voith-Schneider-Propeller (Vorlesung 13)
- ▶ Anwendung bionischer Methoden und Herzunterstützungssysteme (Vorl. 14)

Ähnlichkeit von Strömungsmaschinen

Entwurf des Laufrades einer Radial- oder
Halbaxialmaschine

a) geometrische Ähnlichkeit

b) dynamische Ähnlichkeit

Bei Einhaltung von geometrischer und dynamischer Ähnlichkeit
können entwickelte Maschinen skaliert werden!

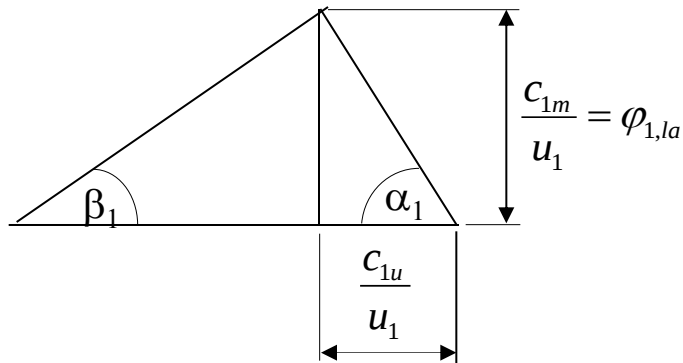
Alle Abmessungen von Großausführung und Modell haben das gleiche Maßstabsverhältnis.

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

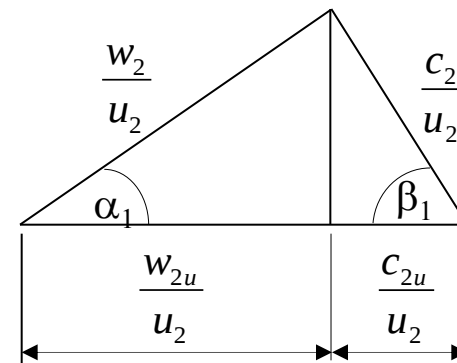
Tafelbild: Ableitung der geometrischen Maßstabsverhältnisse

$$Re = \frac{c \cdot l}{\nu} \quad \text{Reynolds- Zahl, Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskraft}$$
$$Fr = \frac{c}{\sqrt{gl}} \quad \text{Froude- Zahl, Verhältnis von kinetischer und potentieller Energie}$$
$$Eu = \frac{p}{\rho c^2} \quad \text{Euler- Zahl, Druckverhältnisse}$$

Eintritt



Austritt



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

Durchflusszahl

$$\varphi = \frac{Q}{\pi b d u}$$

Volumenstrom, dimensionslos gemacht mit dem Produkt aus Laufradaustrittsfläche und Umfangsgeschwindigkeit

Durchflusszahl

$$\varphi = \frac{Q}{\pi b d u}$$

Volumenstrom, dimensionslos gemacht mit dem Produkt aus Laufradaustrittsfläche und Umfangsgeschwindigkeit

Druckzahl

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

Spezifischen Förderarbeit, dimensionslos gemacht mit der mit u gebildeten Geschwindigkeitsenergie

$$\psi = f(\varphi)$$

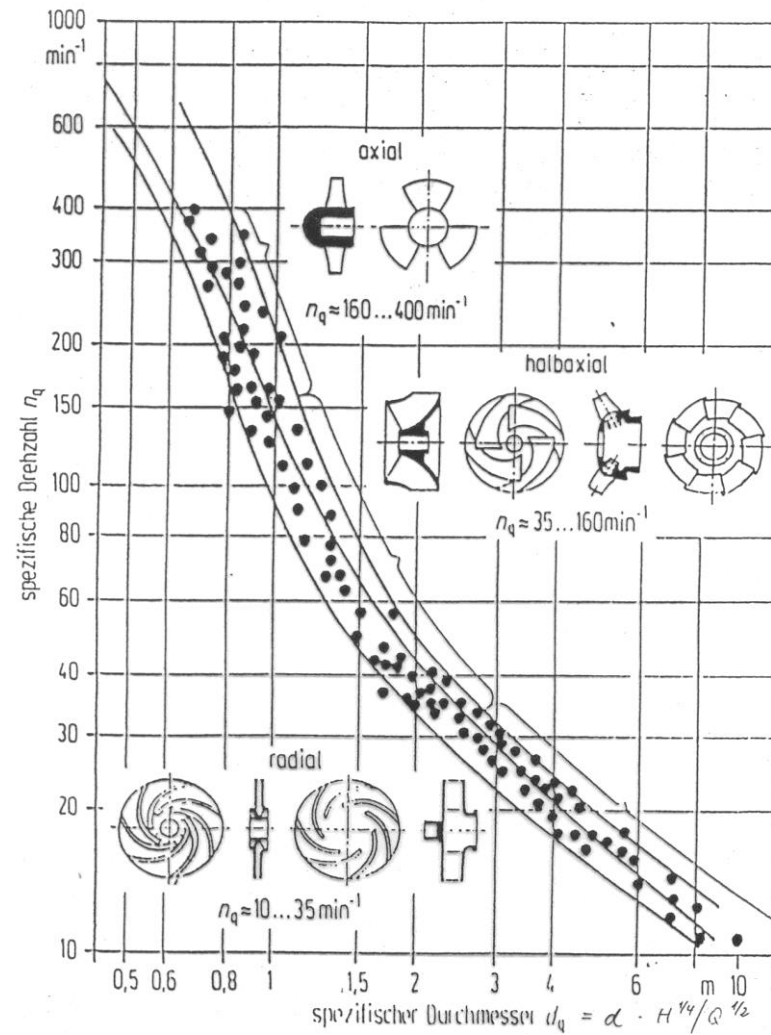
ist eine dimensionslose Darstellung unabhängig von n und D_2

Spezifische Drehzahl

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

Tafelbild: Ableitung spezifische Drehzahl

Cordier-Diagramm



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

Gegeben:

$$Q, H, NPSH_A$$

1. Schritt: Bestimmung der
Hauptabmessungen aus
Erfahrungswerten

$$\psi = f(n_q)$$

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

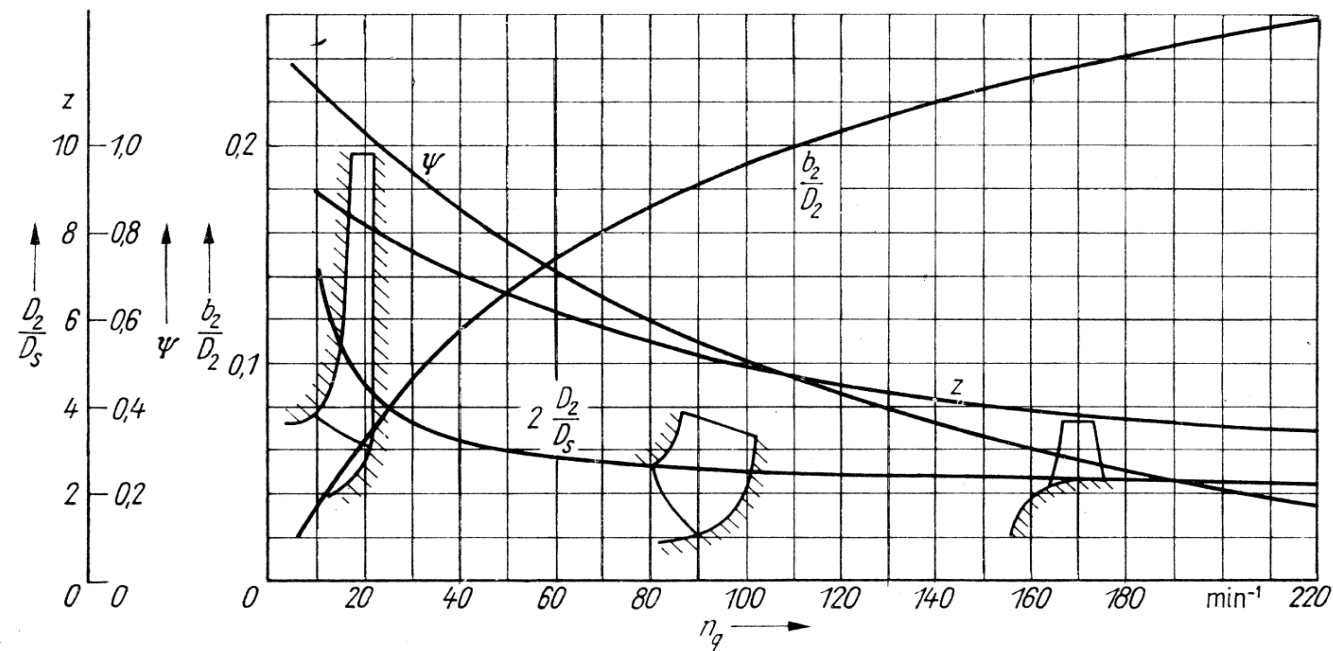
$$\frac{D_2}{D_s} = f(n_q)$$

$$Z = f(n_q)$$

$$Q_R = \frac{Q_N}{\lambda_1}$$

68

4. Kreiselpumpen



entnommen aus Prager, R.: Technisches Handbuch Pumpen

2. Schritt: Entwurf eines Meridianschnittes

$$c_m = \frac{Q}{D b \pi}$$

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 Pfleiderer
auf mehreren Stromlinien

6. Schritt: Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten und
Festlegen eines w - 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

- 9.** Schritt: Entwurf der Leiteinrichtung
- 10.** Optimierung von Laufrad und Leiteinrichtung

Zuströmung berücksichtigen!

Entwurf des Meridianschnitts

Tafelbilder

Bestimmung der Schaufelwinkel



- die Eintrittswinkel der Schaufeln ergeben sich aus dem Feld der Meridiangeschwindigkeit an der Eintrittskante der Schaufeln unter Berücksichtigung der Schaufelversperrung und ggf. eine Vordralls
- die Austrittswinkel der Schaufeln ergeben sich aus der geforderten Schaufelarbeit unter Berücksichtigung von Sekundärströmungseffekten
- durch die Schaufeln muss die Eulergleichung im Strömungsfeld erfüllt werden

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

Ziel: Realisierung des geforderten Dralls

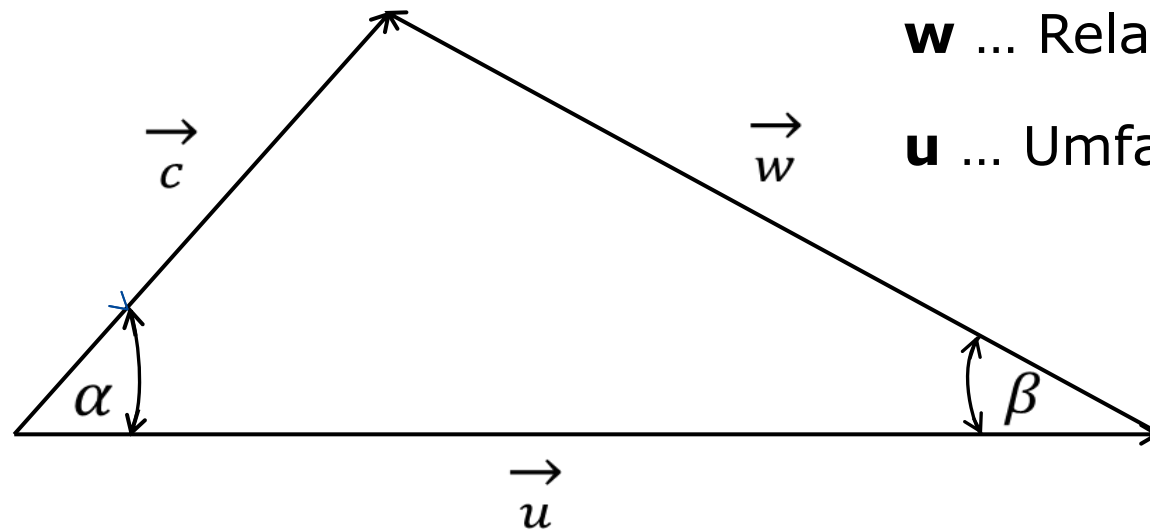
$$c_{3u} * r_{2m}$$

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

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

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

Tafelbild



c ... Absolutgeschwindigkeit

w ... Relativgeschwindigkeit

u ... Umfangsgeschwindigkeit

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}$$

Die Absolutgeschwindigkeit ist gleich der vektoriellen Summe aus Relativ- und Umfangsgeschwindigkeit

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

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

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

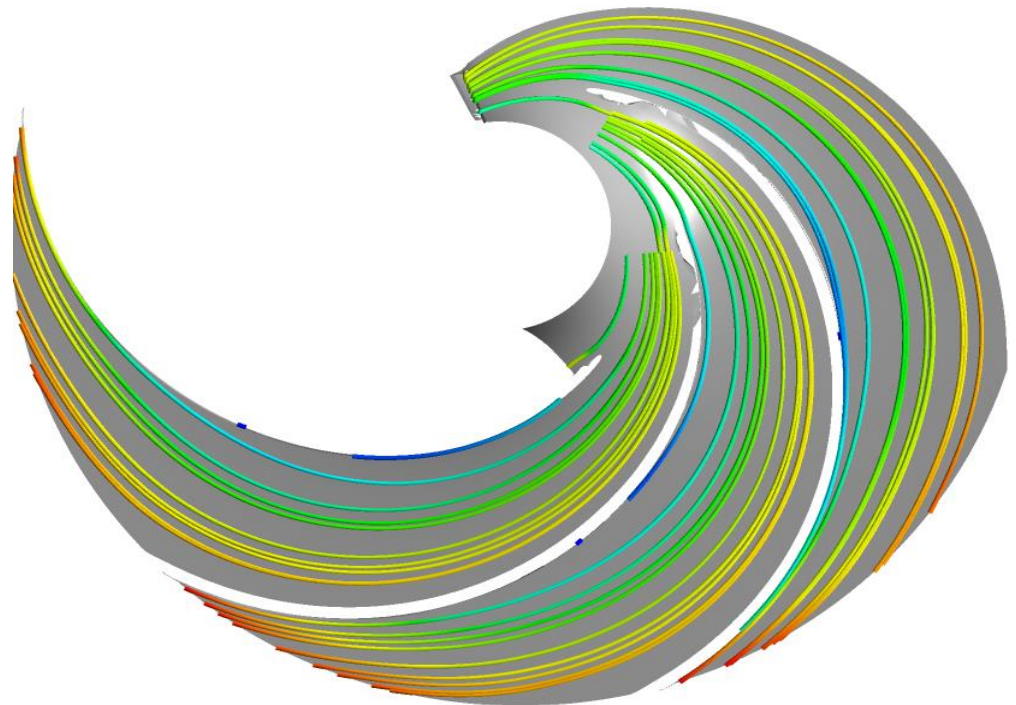
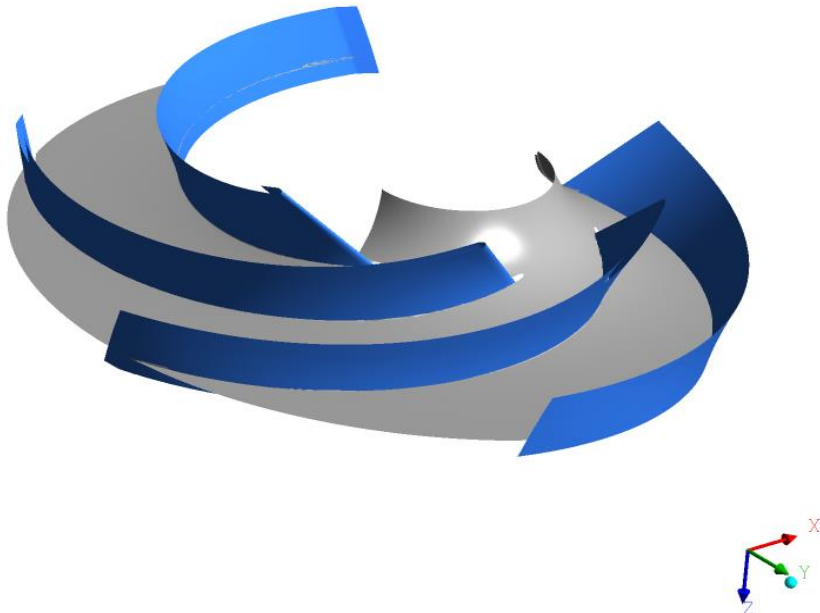
Ursachen: 1) der relative Kanalwirbel (Sekundärströmung von der SS zur DS durch Corioliskräfte)

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

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

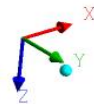
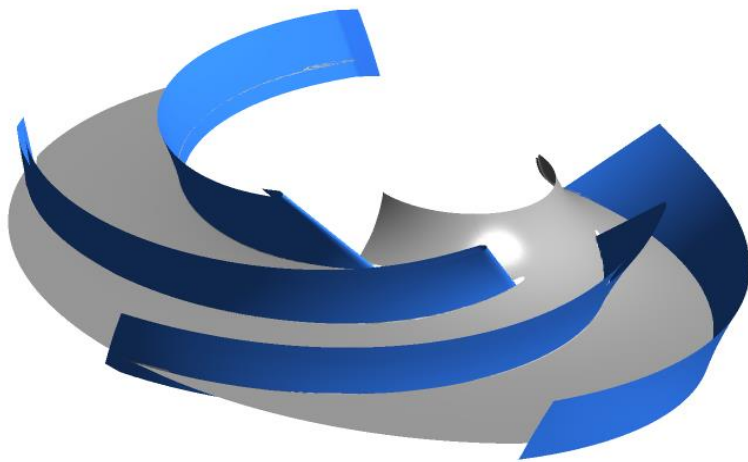
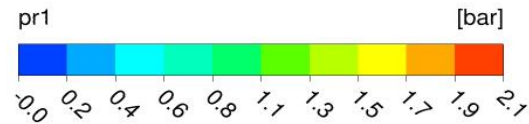
$$\beta_s = \beta_2$$

Tafelbild



Radialrad mit Schaufeln

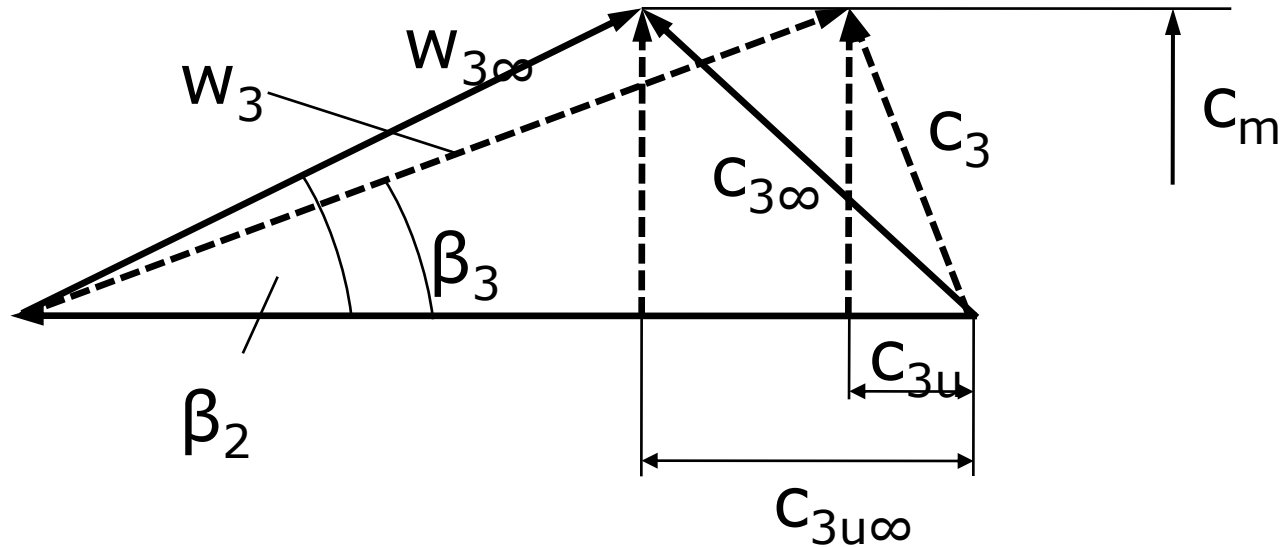
Minderumlenkung



Radialrad



Statischer Druckaufbau in den Laufradkanälen



Verfahren von Pfeleiderer, Stepanoff, Gülich

- ▶ exemplarisch wird das Verfahren von Pfeleiderer gezeigt

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

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

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

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

schaufellosen Diffusor

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

Statisches Moment der Stromlinie

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

Tafelbild

Ziel (meist): stoßfreie Anströmung (Vektor der Relativgeschwindigkeit $\mathbf{w}$ ist tangential zur Mittellinie des Schaufelprofils gerichtet.)

$$Q = c_m \cdot A$$

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

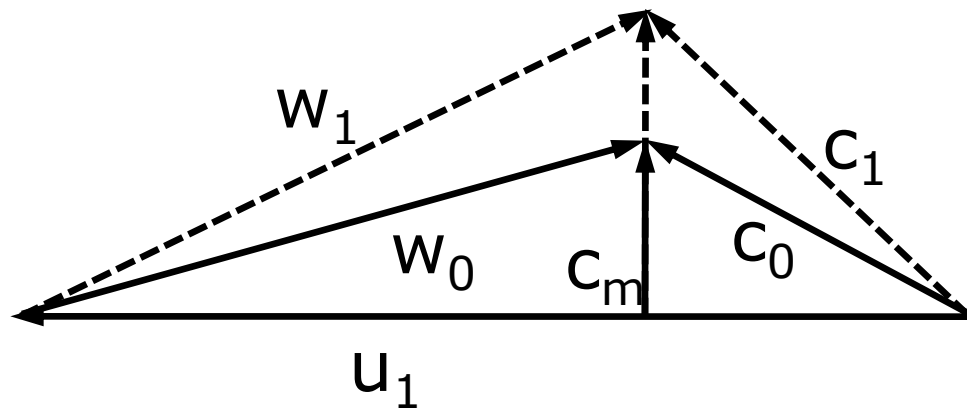
$$c_{1m} = \tau_1 \cdot c_{0m}$$

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

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

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

Tafelbild



► Kreisbogen

► β - Verlauf

► W- Verlauf

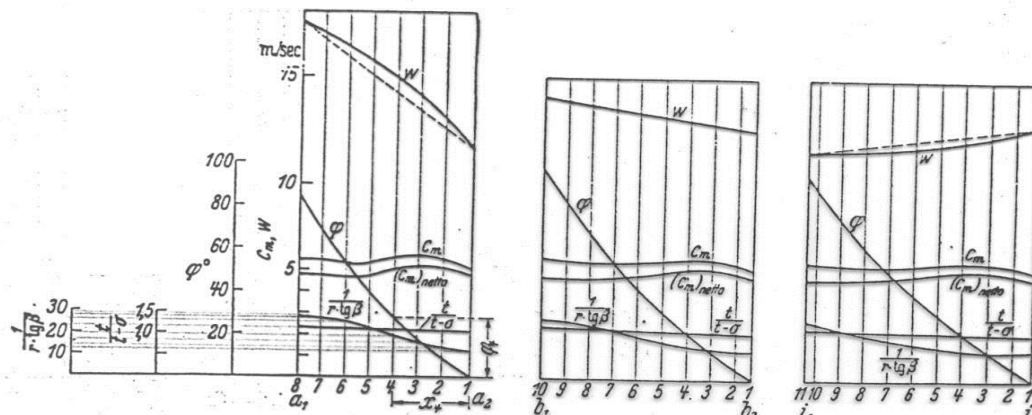
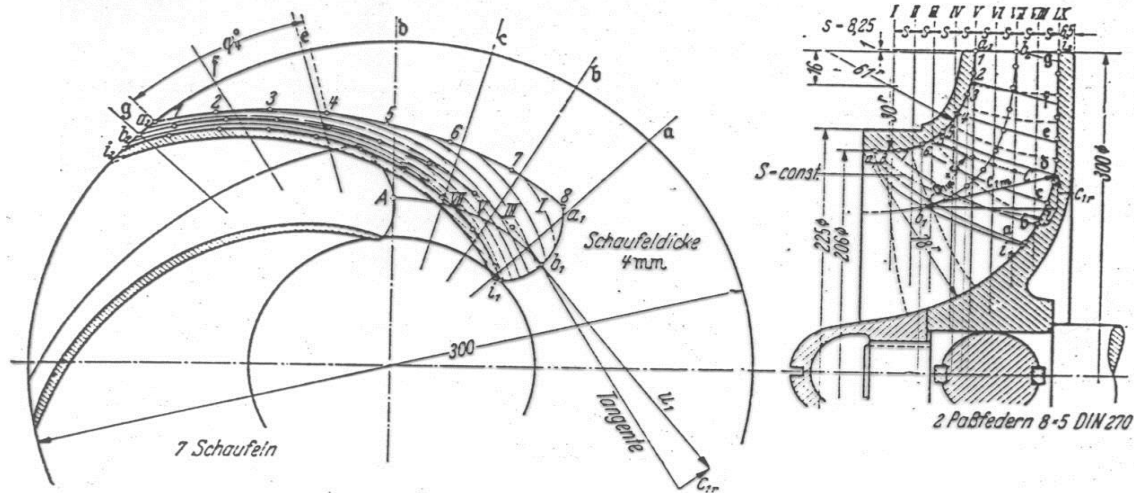
$$w = \frac{c_m}{\sin \beta}$$

Tafelbild



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

Beispiel: doppelt gekrümmte Schaufel



Phasen der Entwicklung eines Pumpenbauteiles (am Beispiel Laufrad)

Entwurf

Konstruktion

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

Prototypenbau und -test

Serieneinführung

Angewendete Methoden

Pfeiderer, Stepanoff, Gülich

2D/3D-CAD

Numerische Verfahren

Versuche

Modelle ⇒ Abguss

Stereolithografiemodell ⇒ Abguss

Kernfertigung mit Laser ⇒ Abguss

Mehrachsenfräsen