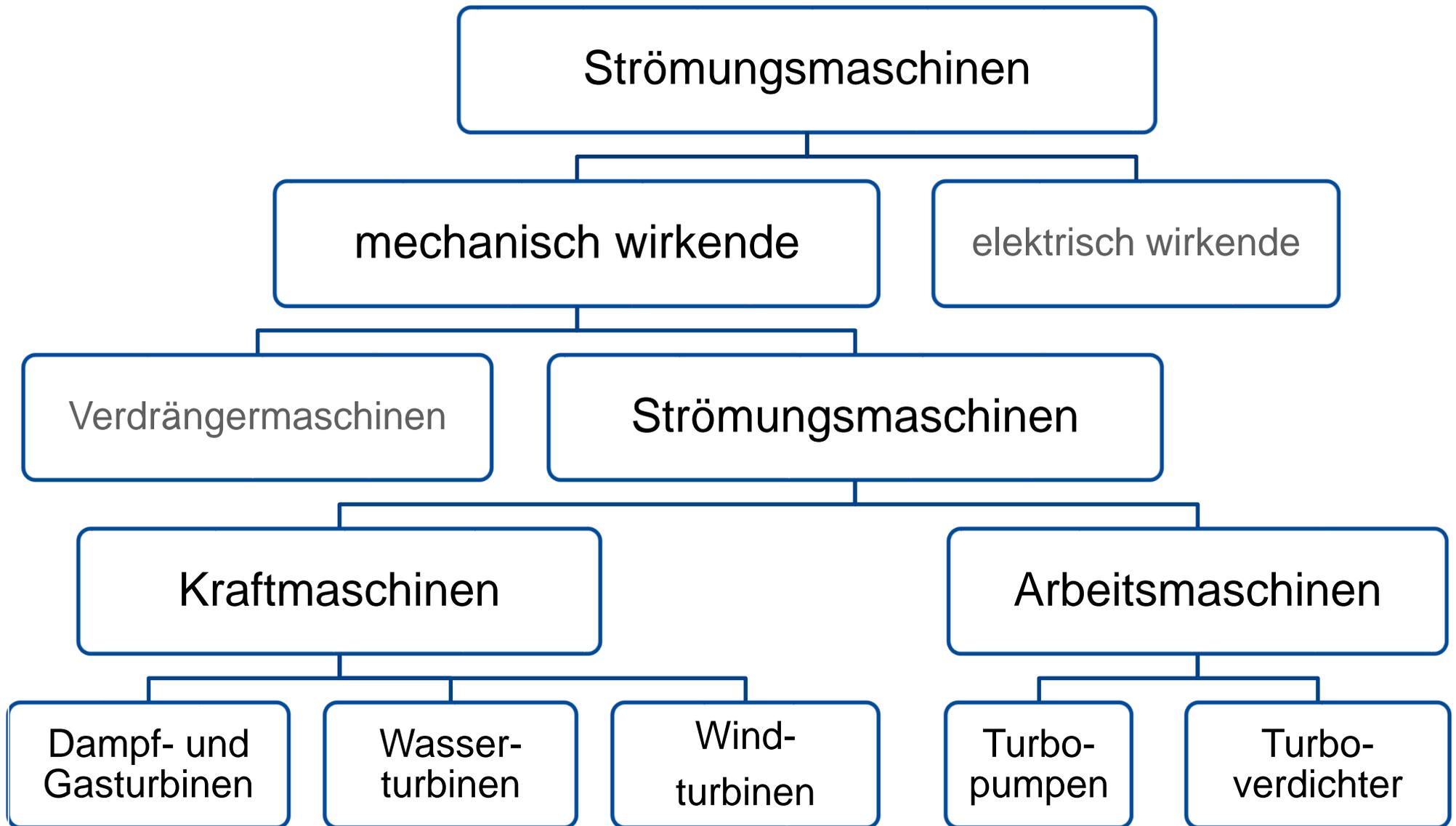


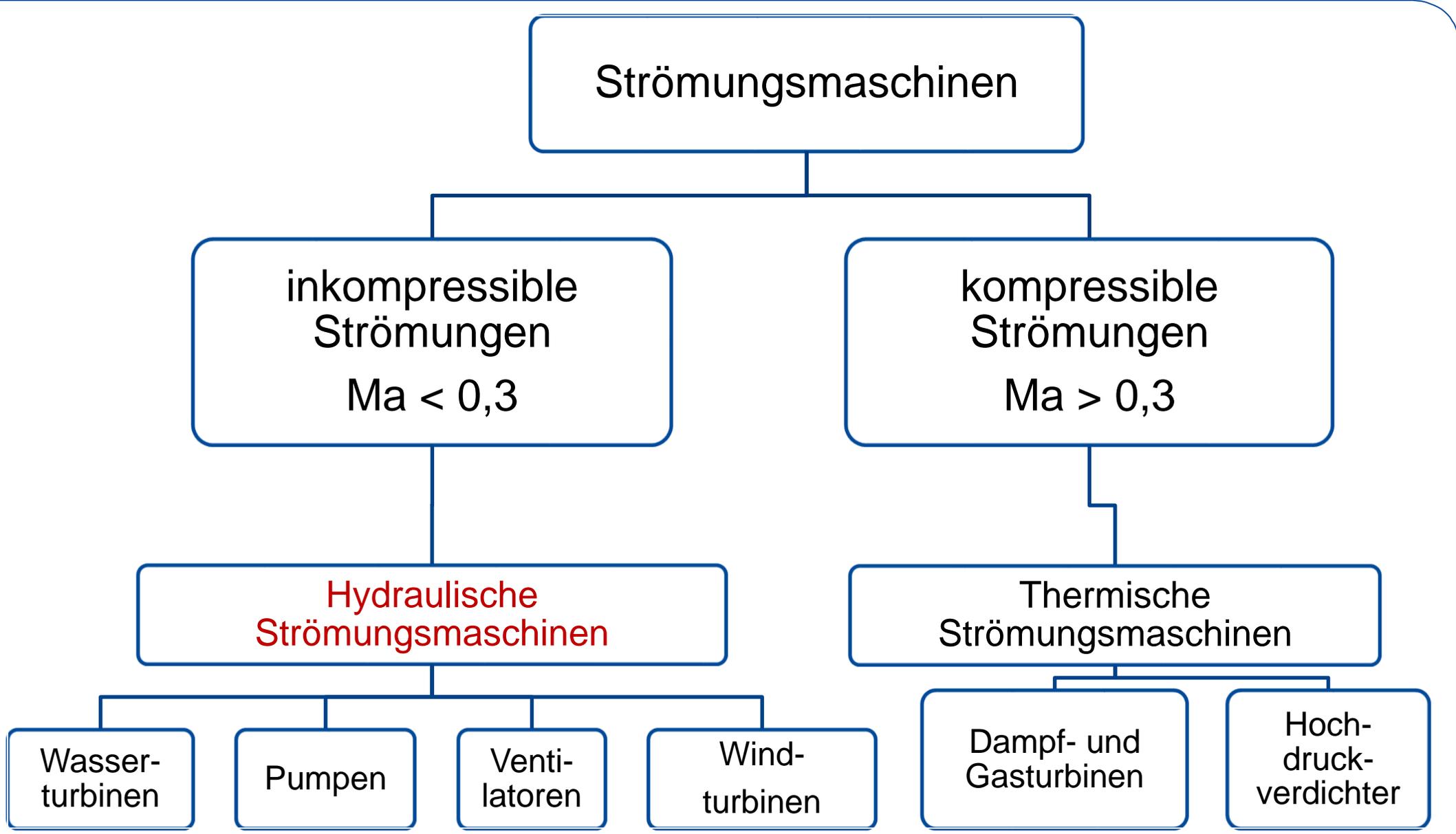
Sommersemester 2018

Kolben- und Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm  
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- Aufbau und Funktionsweise von Flugtriebwerken und den enthaltenen Strömungsmaschinen
- Aufbau und Funktionsweise von Windturbinen
- Aufbau, Funktionsweise und Kennlinien von Pumpen
- **Entwurfsmethoden**
- Optimierungsmethoden





Es existieren unterschiedliche Entwurfsmethoden für

- radial durchströmte Laufräder (Radialpumpen, Radialverdichter etc. – Gegenstand der Vorlesung „Hydraulische Strömungsmaschinen“)
- axial durchströmte Laufräder mit Gehäuse (Axialpumpen, Axialverdichter, etc. – Gegenstand der Vorlesung „Thermische Strömungsmaschinen“)
- axial durchströmte Laufräder ohne Gehäuse (Schiffspropeller, Wind- und Gezeitenturbinen, etc. – Gegenstand der Vorlesung „Windturbinen und alternative Energiequellen“)

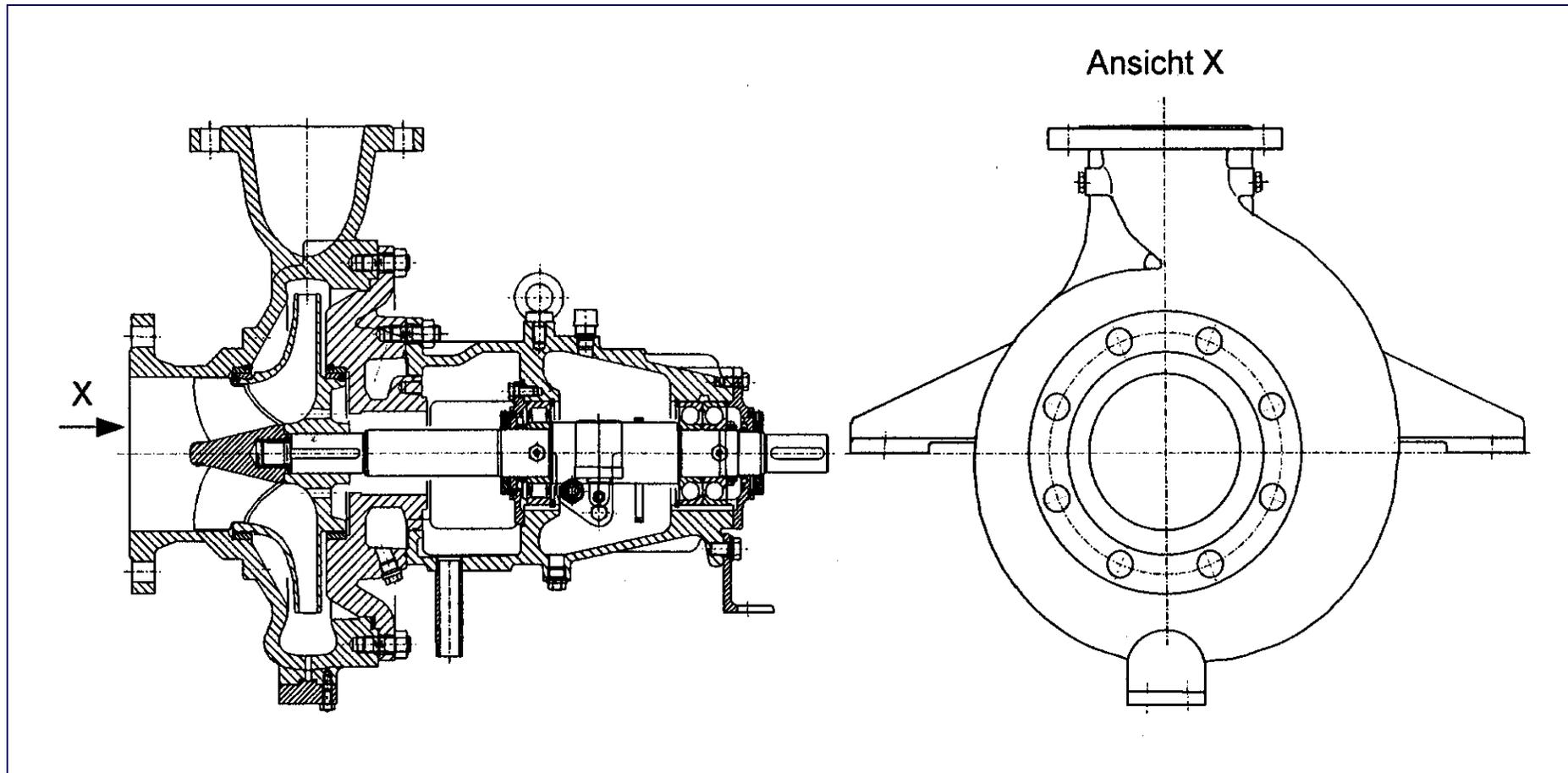


- Leiträder
- Leiträder in Kombinationen mit Rückführschaufeln
- Spiralgehäuse (selten in Kombination mit einem Leitrad)



- für alle Maschinenausführungen gleich
- Optimierung des strömungs- und des strukturmechanischen Verhaltens

# Typische Industriepumpe zur Förderung von Prozessmedien oder für Heiz- und Kühlanwendungen



einstufige Spiralgehäusepumpe mit radial durchströmten Laufrad, Sulzer Pumpen AG

Laufrad: Erzeugung des gewünschten Dralls in jedem Schnitt

Leitrad: Abbau des Dralls bis zum gewünschten Restdrall und Verzögerung der Strömung → Druckaufbau

—→ Realisierung der Ziele mit möglichst geringem Totaldruckverlust und oft auch Einhaltung von Kavitationskriterien

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

an der Welle übertragenes Moment

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

von den Schaufeln übertragenes Moment

mit  $u = \omega r$

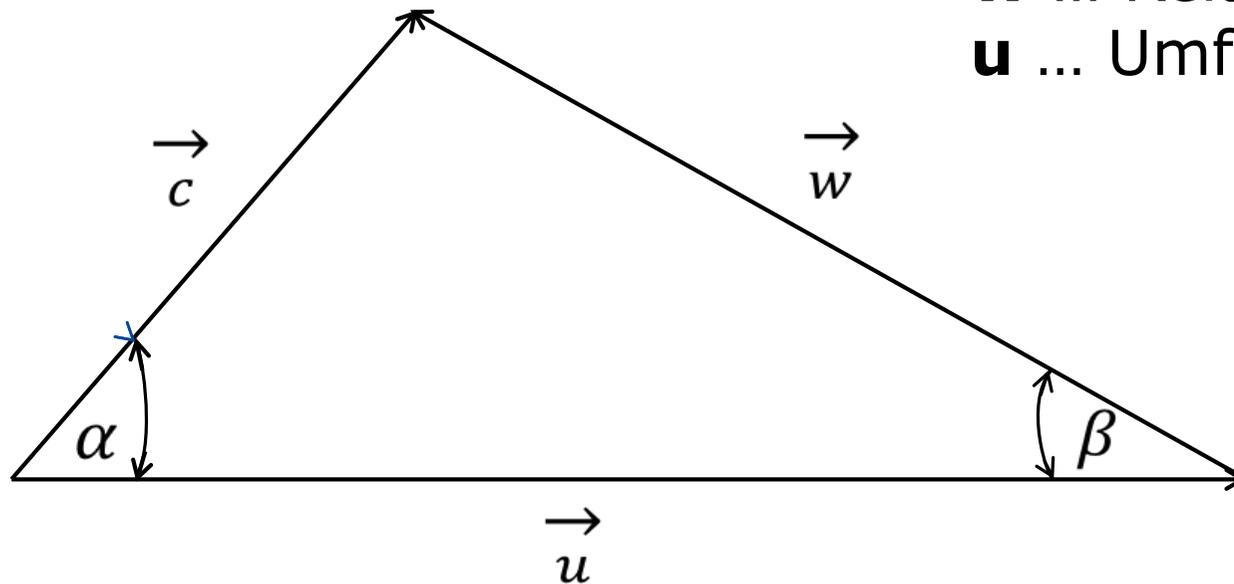
$$P_{\text{sch}} = M_{\text{sch}} \cdot \omega = m (u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{0u}) \quad \text{Leistung}$$

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

spezifische Förderarbeit

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

**Euler'sche Turbinengleichung  
(1754)**



**c** ... Absolutgeschwindigkeit  
**w** ... Relativgeschwindigkeit  
**u** ... Umfangsgeschwindigkeit

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

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



- Entwurfsverfahren müsse Änderungen der Strömung am Ein- und Austritt des Schaufelkanals berücksichtigen.

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

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

# Minderumlenkung, Deviationswinkel – Verhältnisse am LR- Austritt

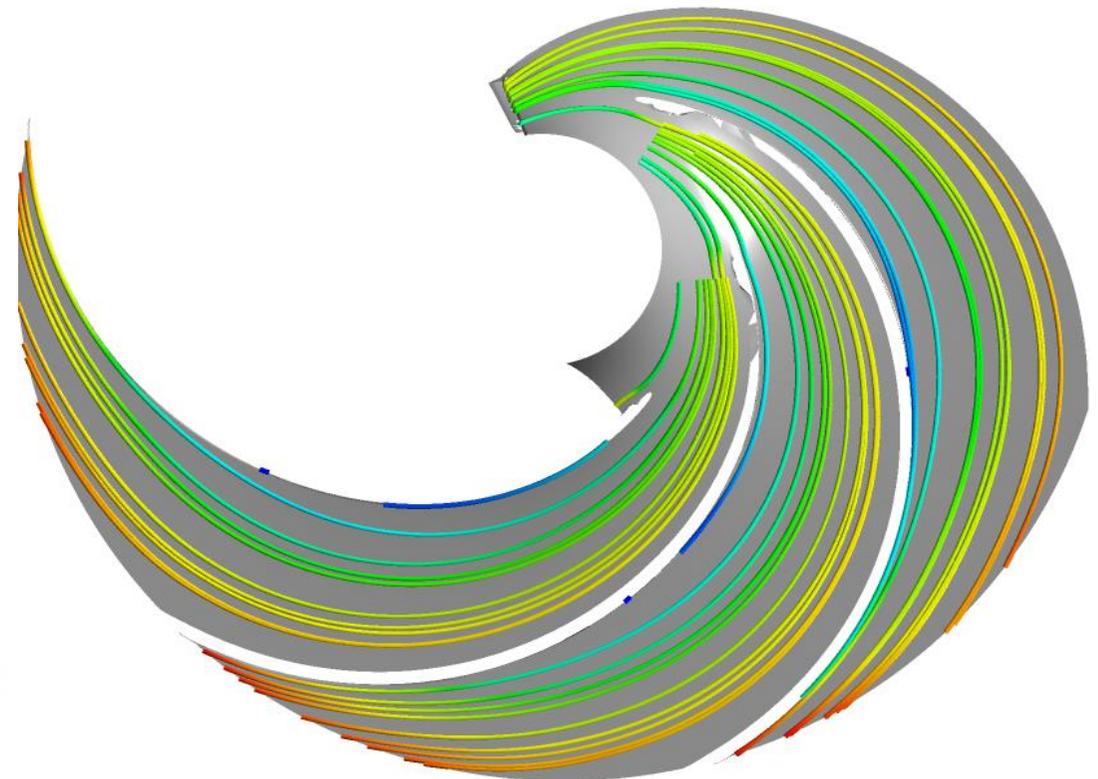
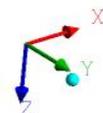
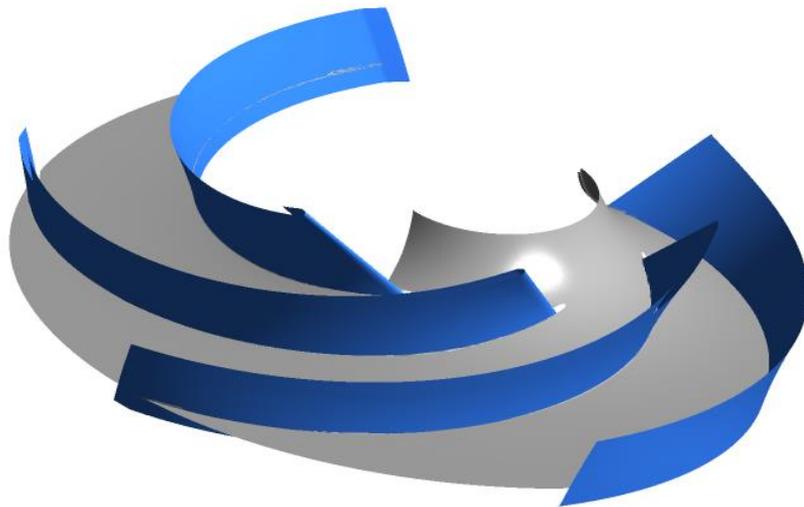
In der Realität ist die Abströmung aus dem Laufrad nicht schaufelkongruent.

Ursachen: 1) der relative Kanalwirbel (Sekundärströmung von der SS zur DS durch Corioliskräfte)  
2) Reduzierung des Druckunterschiedes zwischen SS und DS im „Schrägabschnitt“

Deviationswinkel:

$$\delta = \beta_2 - \beta_3$$

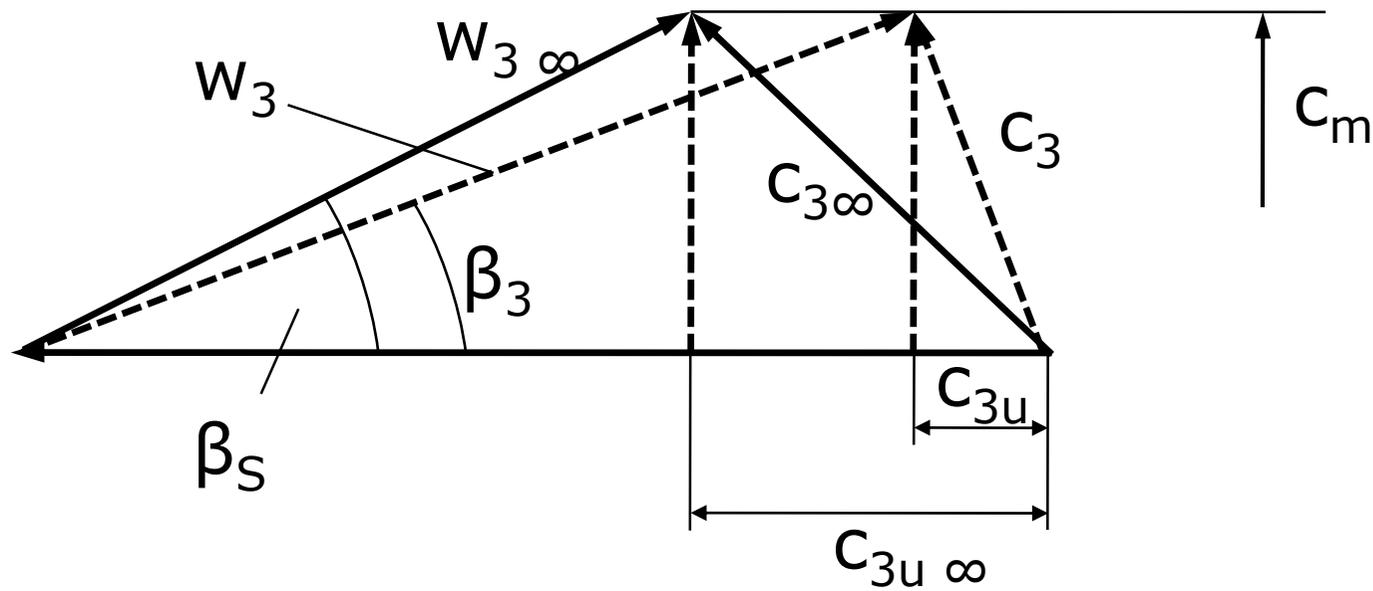
$$\beta_{Schaufel} = \beta_2$$

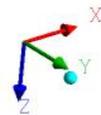
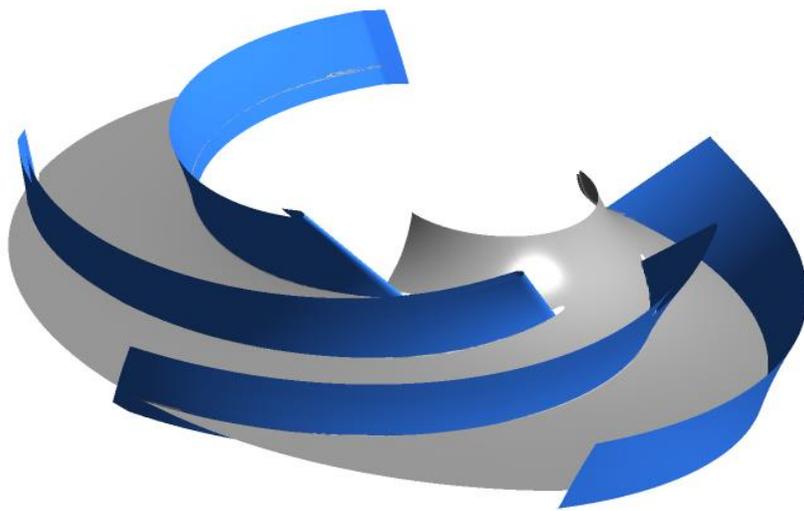
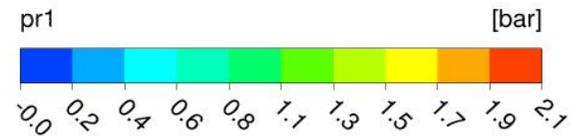


**Radialrad mit Schaufeln**

**Minderumlenkung**

# Auswirkung der Minderumlenkung





**Radialrad**



**Statischer Druckaufbau in den Laufradkanälen**



## **Verfahren von Pfeiderer, Stepanoff, Gülich**

- ▶ exemplarisch wird das Verfahren von Pfeiderer gezeigt

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

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

p ... 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

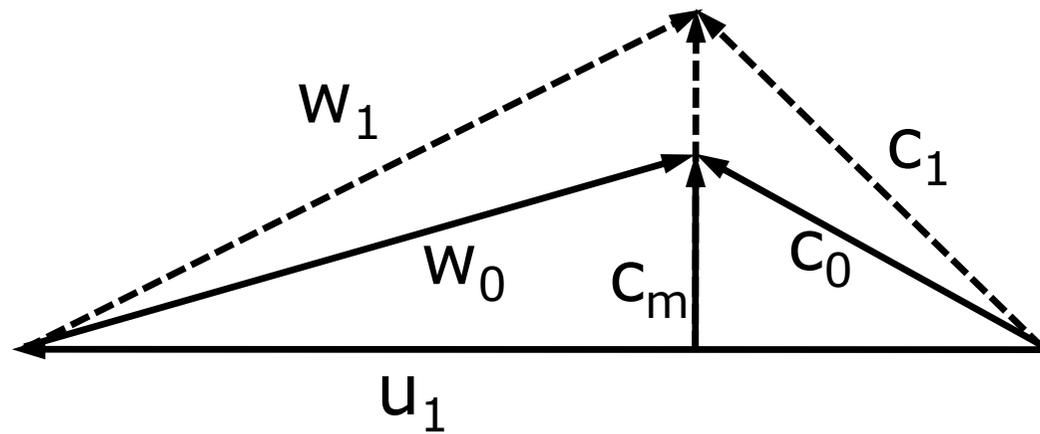
$$\psi' = (0,65 \dots 0,85) \left(1 + \frac{\beta_2^\circ}{60}\right)$$

schaufellosen Diffusor

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

Statisches Moment der Stromlinie

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



$$Q = c_m \cdot A$$

$c_{0m}$  erhöht auf  $c_{1m}$  durch Schaufelversperrung

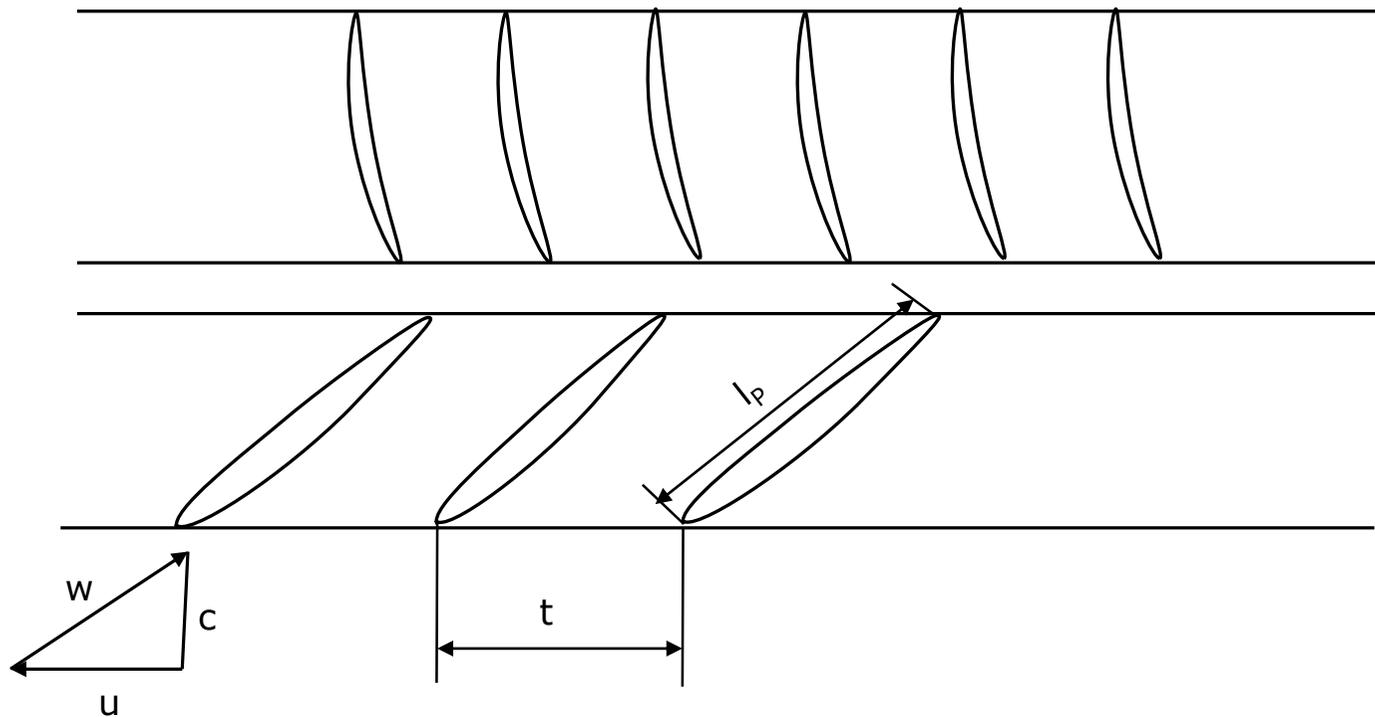
$$c_{1m} = \tau_1 \cdot c_{0m}$$

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

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

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

# Axialmaschinen





Realisierung der geforderten  $\beta_0$  und  $\beta_3$  benötigt eine Ausführung von  $\beta_1$  und  $\beta_2$ , die eine stoßfreie Anströmung ermöglichen und die Minderumlenkung von Schaufelgittern berücksichtigen.

- **Tragflügelmethode**

Vorteil: - sehr gut vermessene Einzelprofile

Problem: - Gittereinfluß  
- Rotationseinfluß

- **Stromfadenmethode**

## ▪ **Gittermethode**

In der Vorlesung wird eine Methode auf der Basis von Gitterberechnungen und Gittermessungen vorgestellt. Dieses Verfahren wurde von H. Wolf entwickelt, siehe z.B. Wolf, H.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für Verdichtergitter. Maschinenbautechnik 12 (1963), Heft 8

- Beschreibung der Geometrie
- Beschreibung der strömungstechnischen Eigenschaften

- freie Kontur (Erzeugung über Singularitätenverfahren oder völlig beliebig, z.B. nach Vorgabe einer Belastungsverteilung)
- Katalogprofile
  - NACA
  - Göttinger Profile
  - Eppler Profile
  - usw.



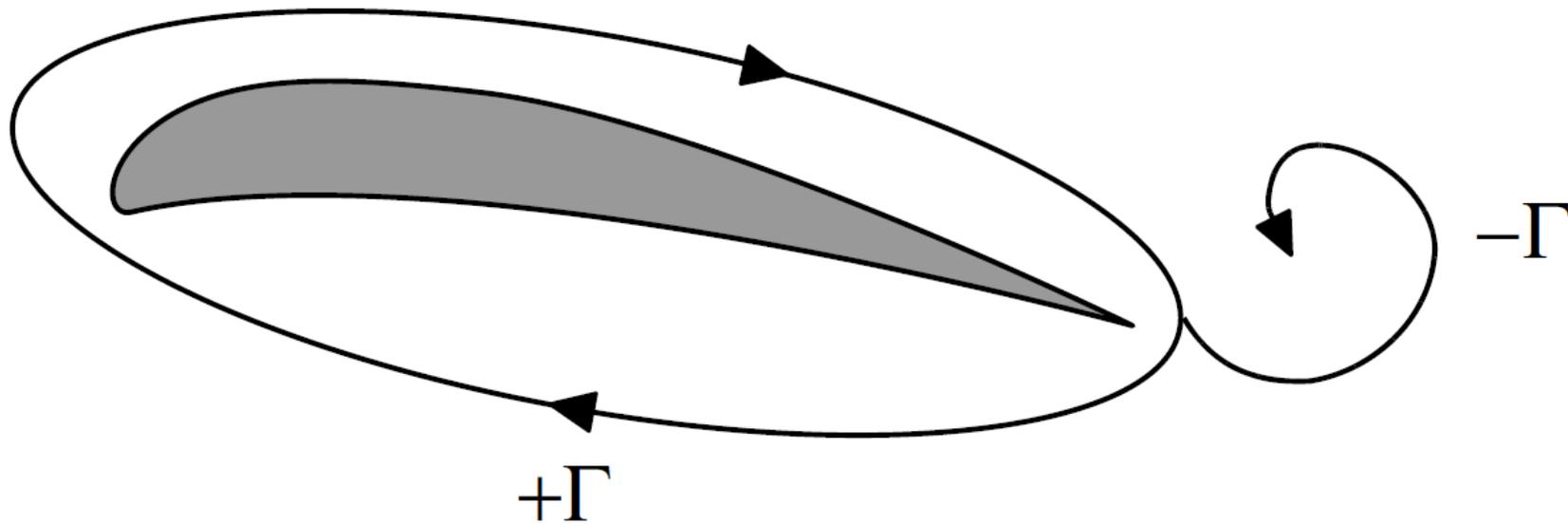
- Das gewölbte Profil entsteht durch eine Überlagerung eines symmetrischen Tropfens mit einer Skelettlinie.



- Druckverteilung um das Profil
- Auftrieb als integraler Wert
- Widerstand als integraler Wert
- Moment
- Gleitwinkel

**Messung dieser Werte im Windkanal am Einzelprofil  
oder im Gitterverband.  
Alternative wäre/ist die Berechnung aus Simulationen.**

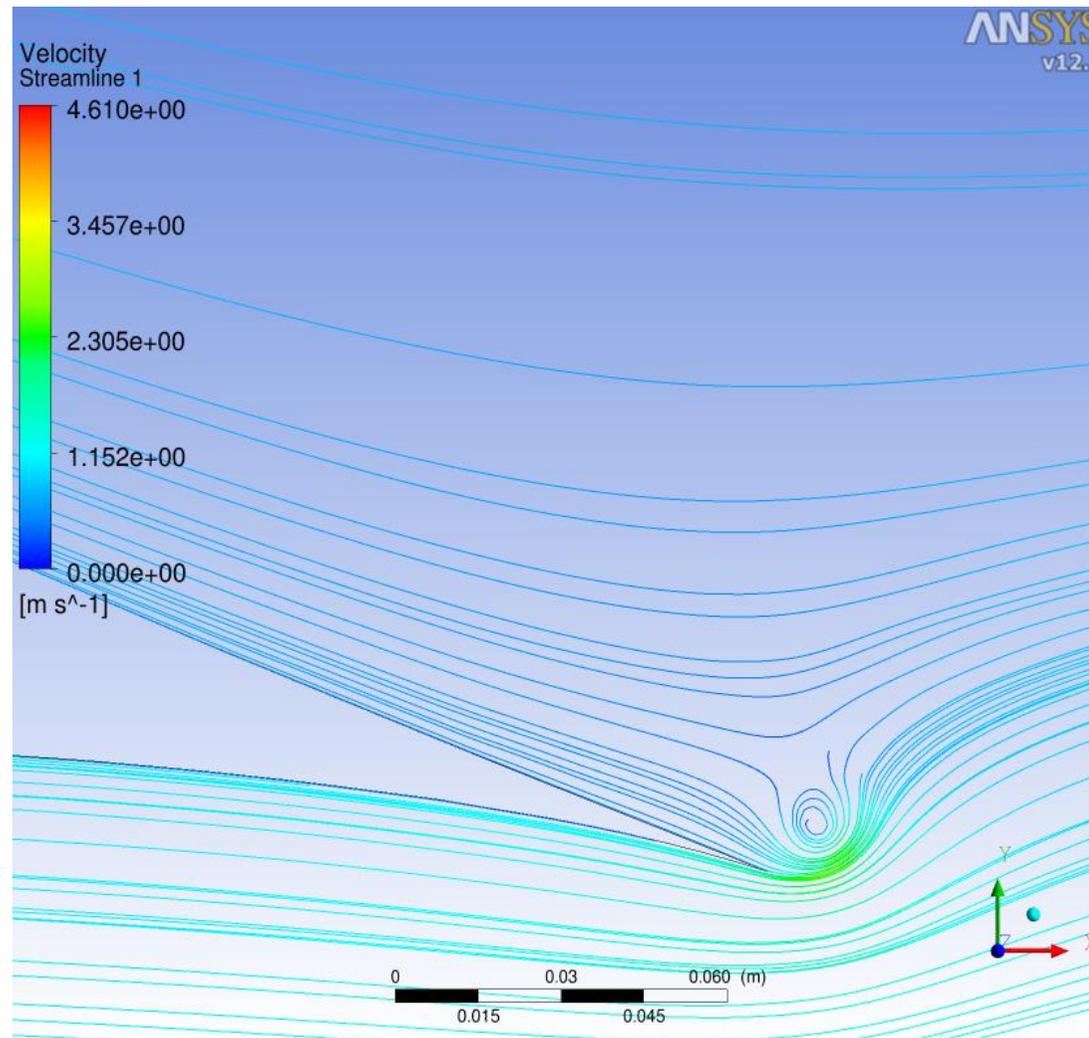
# Profilumströmung - Anfahrwirbel



Zirkulation: Gesamtaussage über die Drehung in einem großen Bereich

für geschlossene Kurve  $I$  bilden wir das skalare Produkt: Wegelement  $\times$  Geschwindigkeit und integrieren über die geschlossene Kurve bei festgehaltener Zeit in Richtung des Weges  $= \oint_C \mathbf{c} \cdot d\mathbf{l}$

Zusammenhang Drehung und Zirkulation wird über den Stokesschen Satz hergestellt.



gerechneter Anfahrwirbel hinter einem umströmten Profil nach 0.015 s bei einem Anstellwinkel von 8 Grad

Die Zirkulation ist das Integral der Geschwindigkeit entlang einer geschlossenen Kurve.

Zirkulation

$$\Gamma = \oint c_{\tan} dl$$

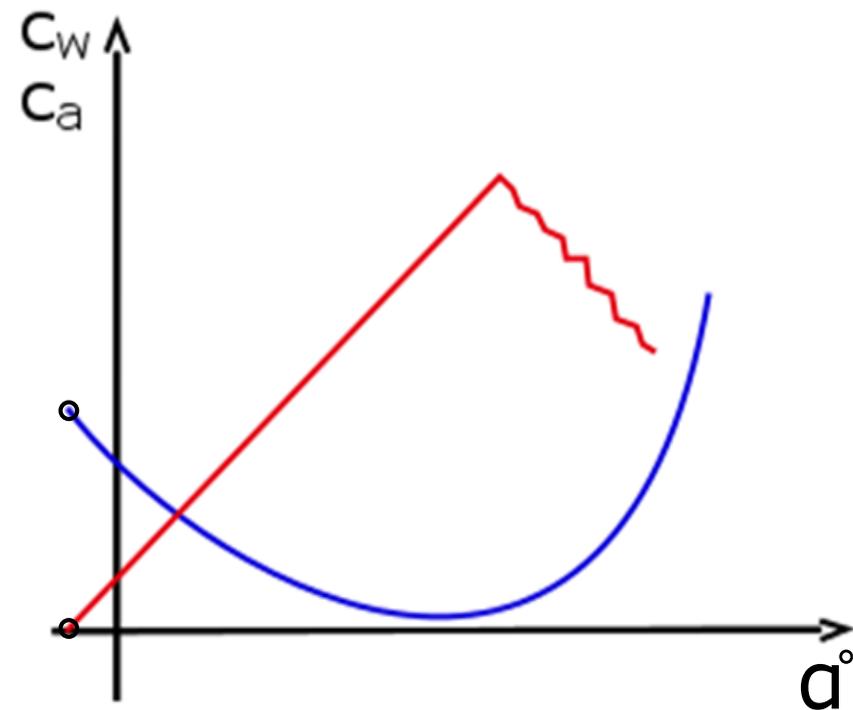
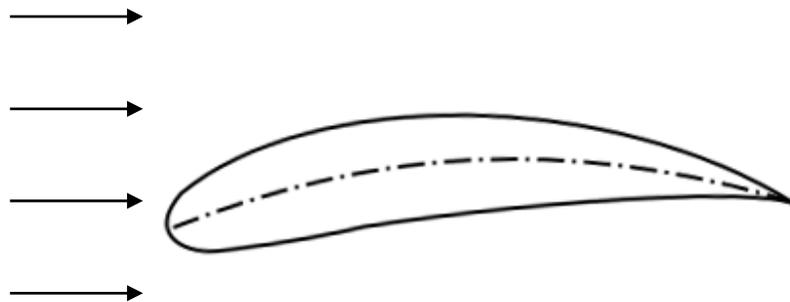
Auftriebskraft

(Satz von Kutta, Joukowski)

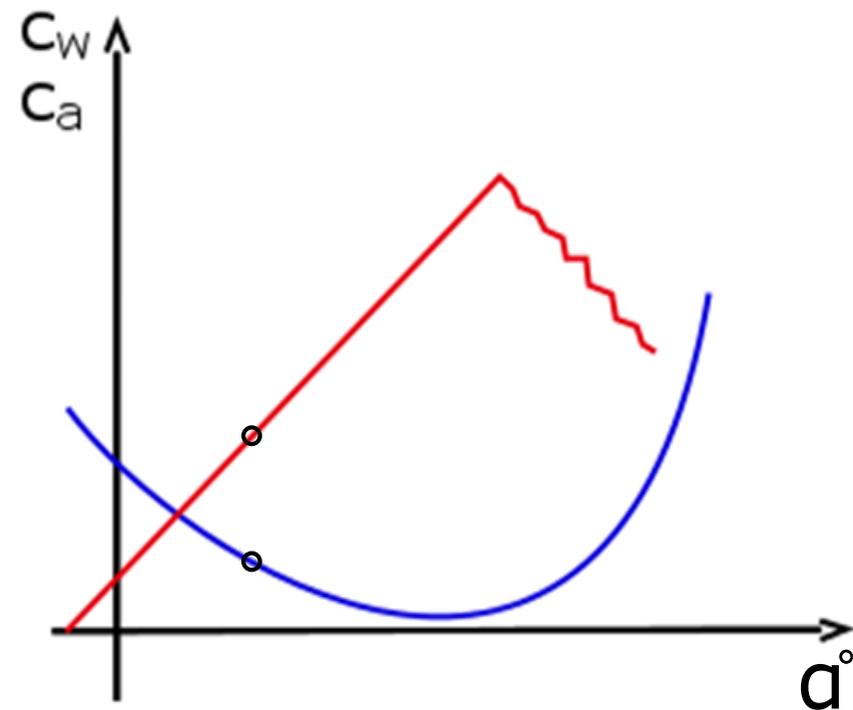
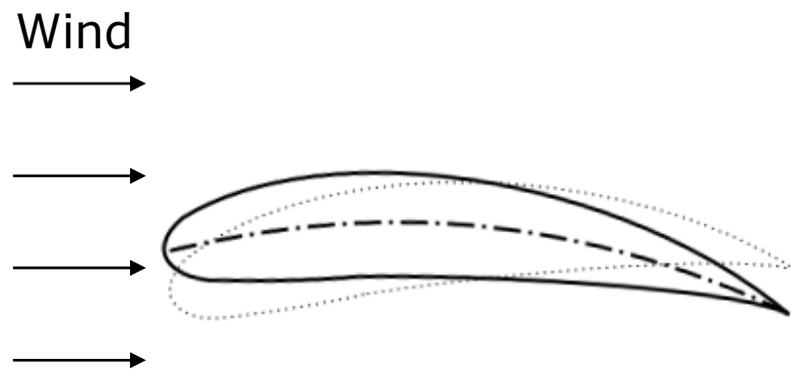
$$F_A = \rho \cdot c_{\infty} \cdot \Gamma \cdot b$$

## Anstellung $-3^\circ$

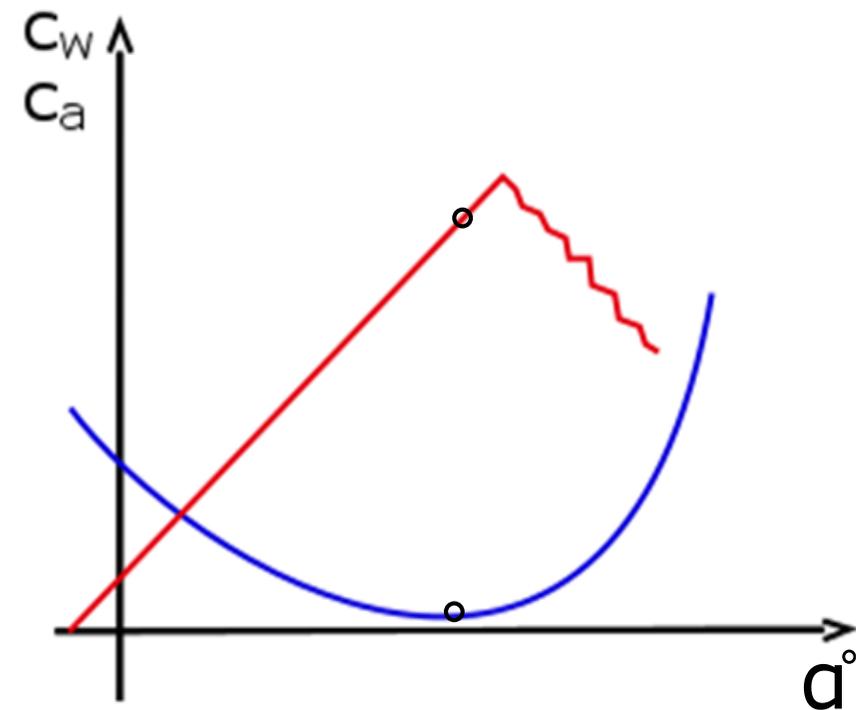
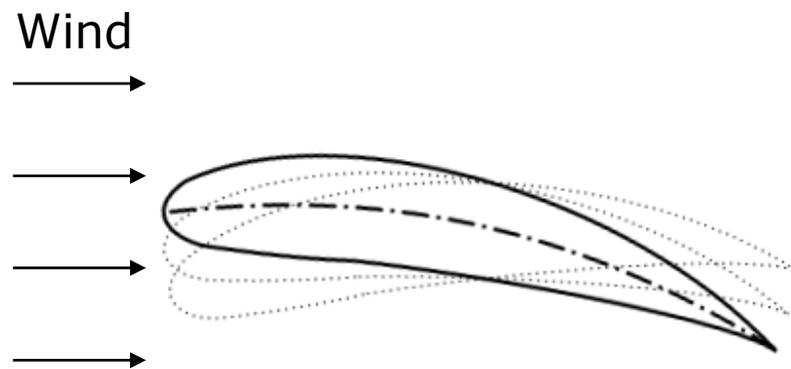
Zuströmung



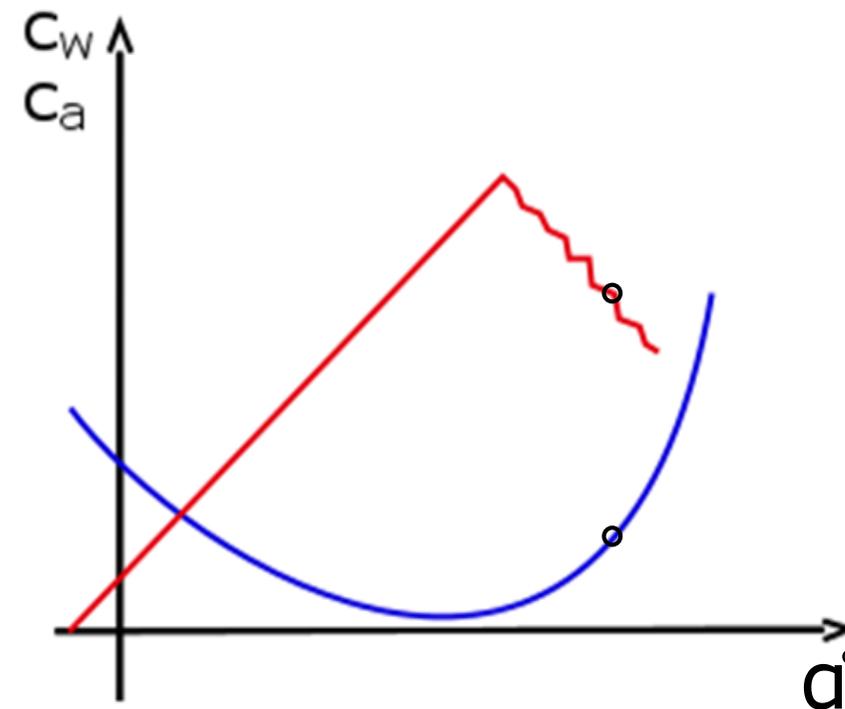
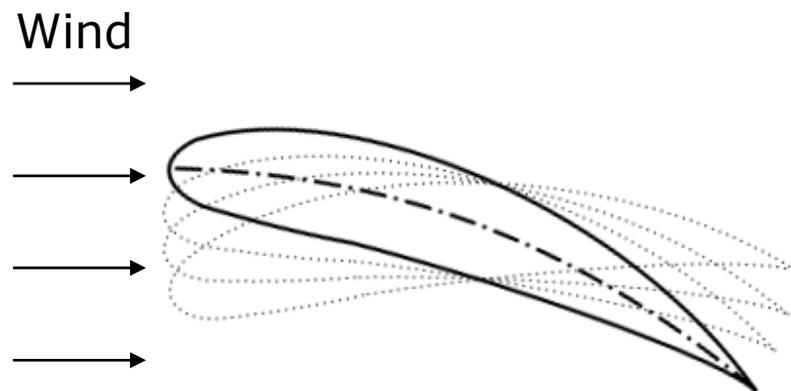
## Anstellung $5^\circ$

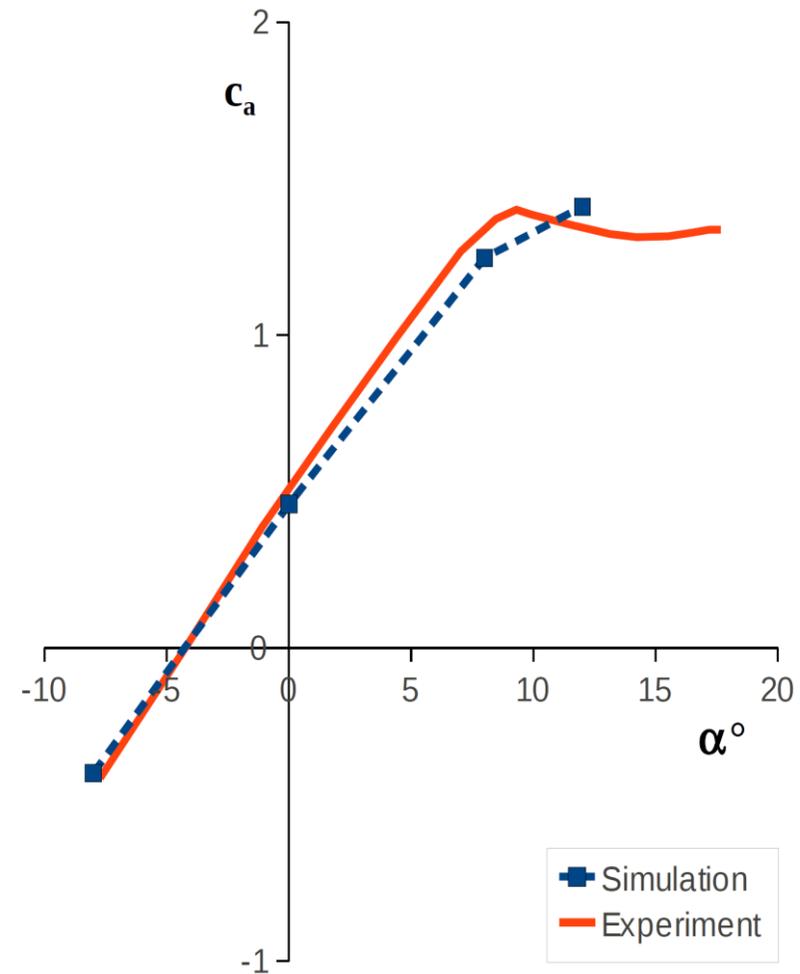
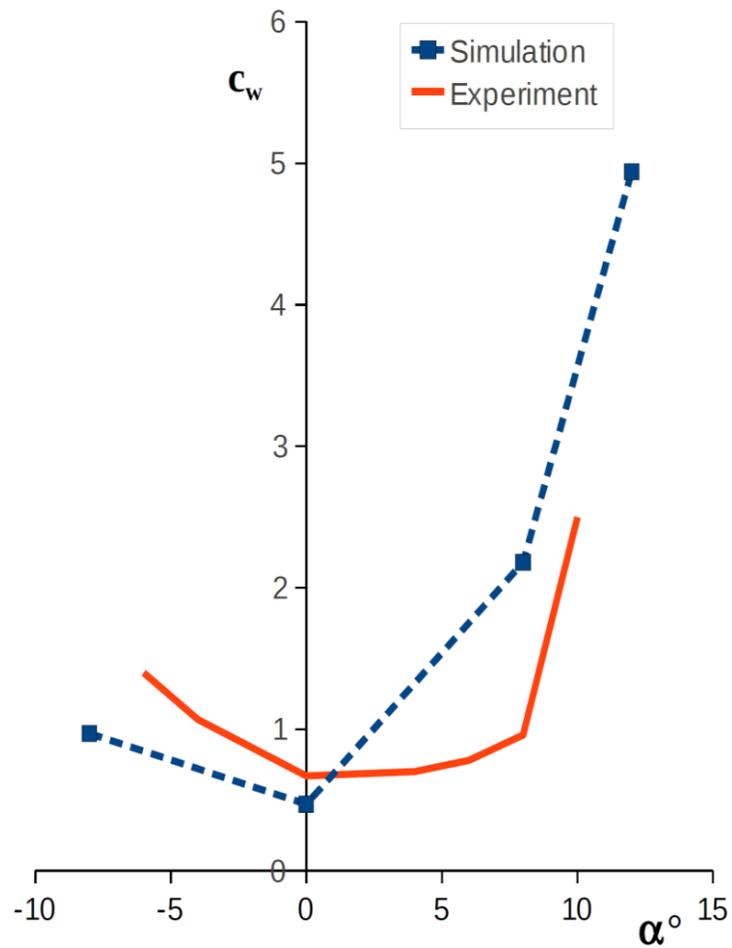


## Anstellung $12^\circ$



## Anstellung $20^\circ$

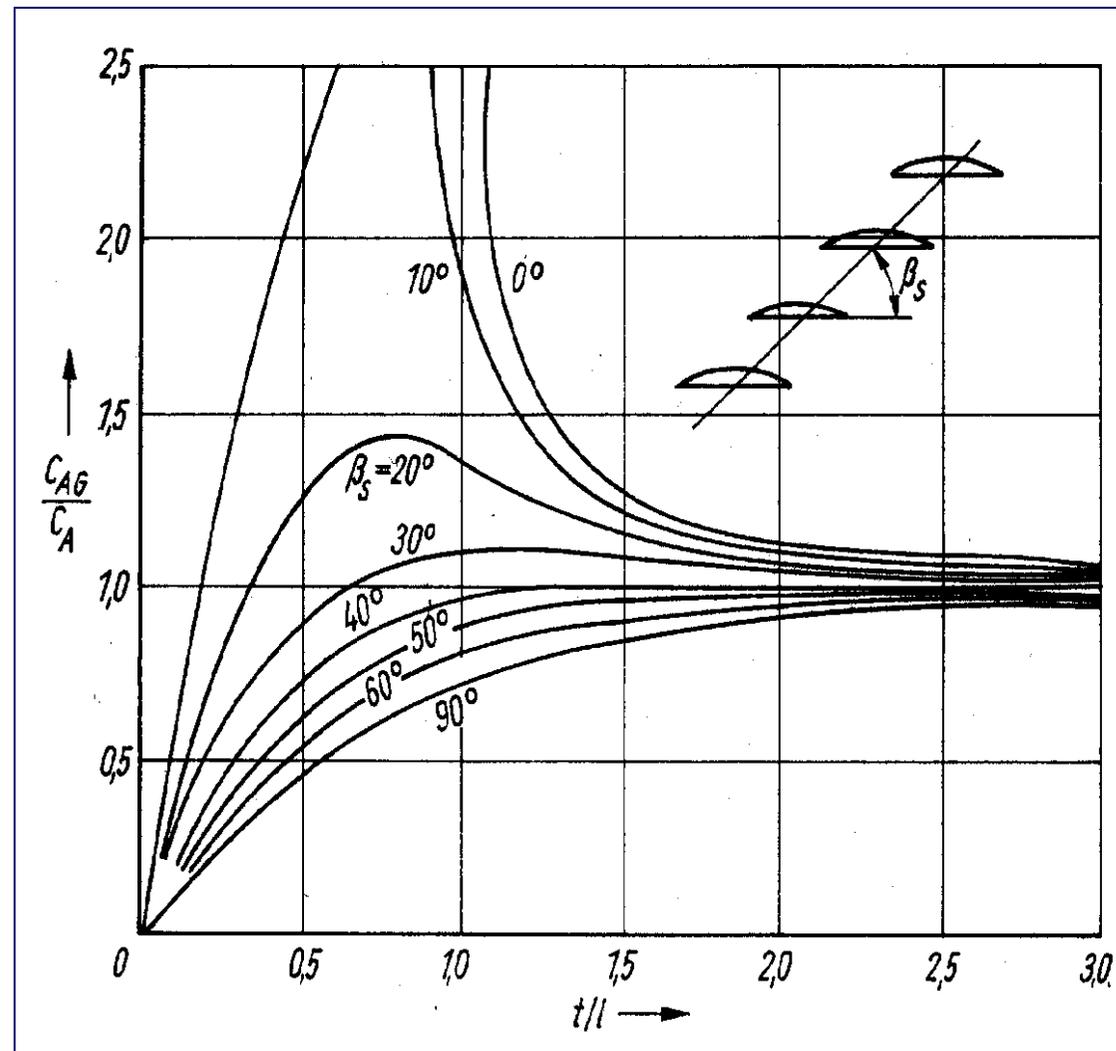




# Tragflügelprofile – Nutzung in einer Strömungsmaschine

- Einfluss des Gitters muss untersucht werden
- Kenntnisse zum Einfluss der Rotation wären hilfreich

# Einfluss des Gitters auf den Auftriebsbeiwert



Quelle: W. Pohlentz "Bauteile für Pumpen"