

Sommersemester 2016

Thermische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm

Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Inhalt der Vorlesung

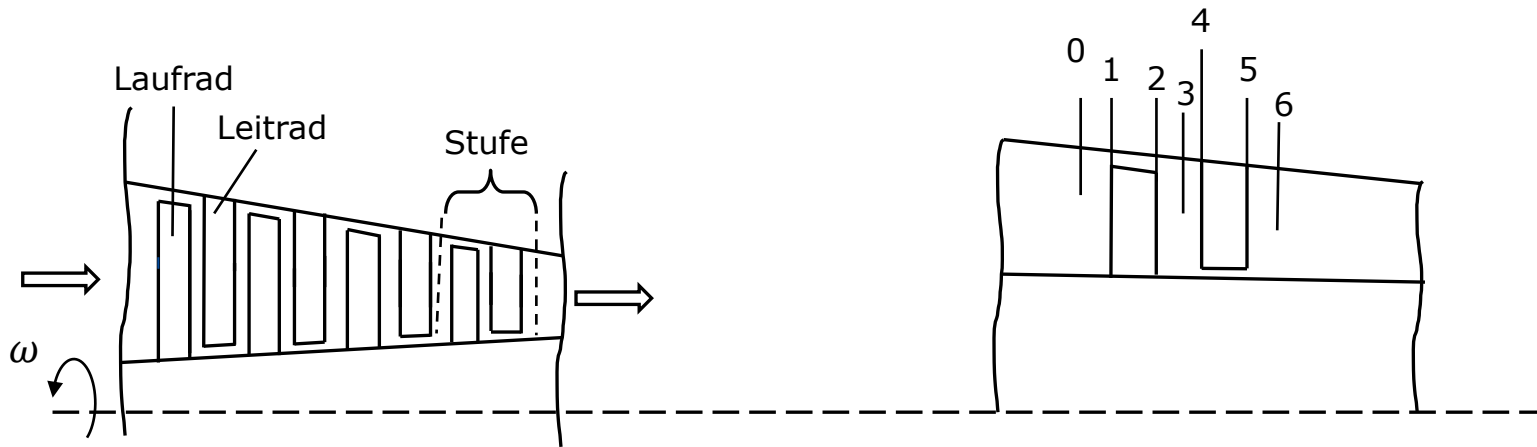
Thermische Strömungsmaschinen

- Einführung / industrieller Hintergrund (V1)
- Thermodynamische Grundlagen (V2)
- Grundlagen der Strömungsmechanik kompressibler Fluiden (V3)
- **Entwurf von Verdichtern (V4+V5)**
- Dreidimensionale Strömungseffekte in Axialverdichtern und -turbinen (V6)
- Kennlinien und Regelung von Verdichtern (V7)
- Brennkammer und Turbine (V8)

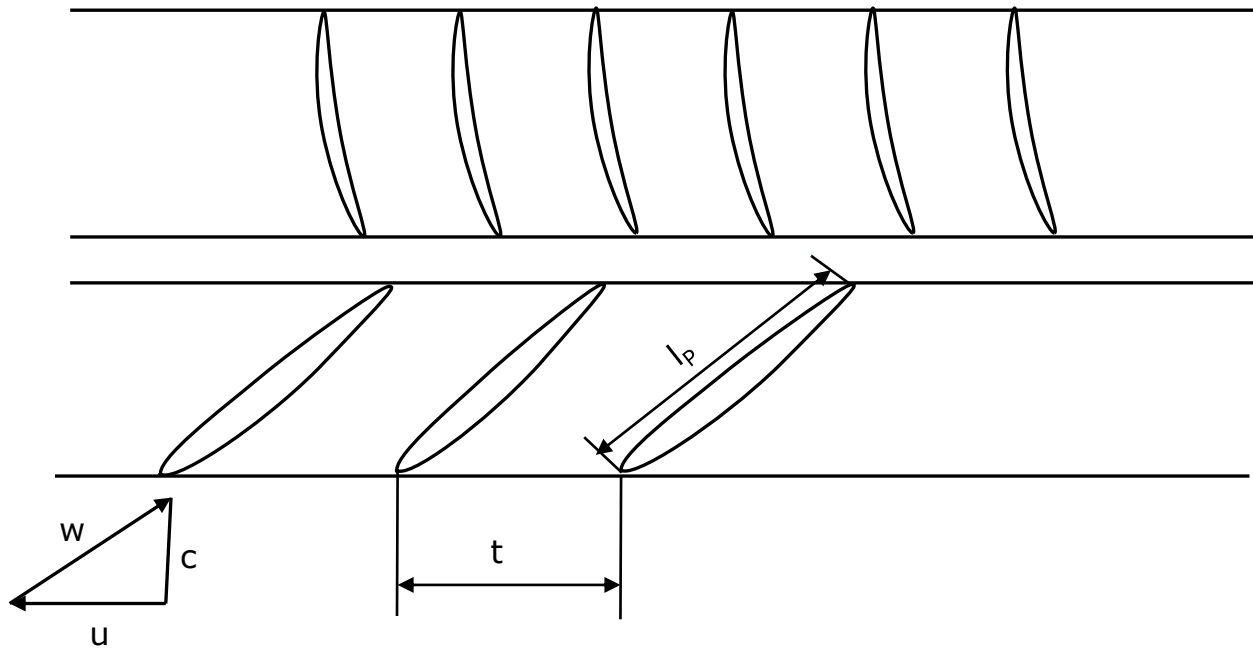
Inhalt der Vorlesung

Thermische Strömungsmaschinen

- Grundlagen der Dampfturbinen (V9+10+11)
- Schallquellen in Strömungsmaschinen und Einführung in die Akustik (V12+13)
- Zusammenfassung und Prüfungsvorbereitung (V14)



Axialverdichter



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



Realisierung der geforderten β_0 und β_3 benötigt eine Ausführung von β_1 und β_2 , die eine stoßfreie Anströmung ermöglichen und die Minderumlenkung von Schaufelgittern berücksichtigen.

- **Tragflügelmethode**

Vorteil: - sehr gut vermessene Einzelprofile

Problem: - Gittereinfluß
- Rotationseinfluß

- **Stromfadenmethode**

- **Gittermethode**

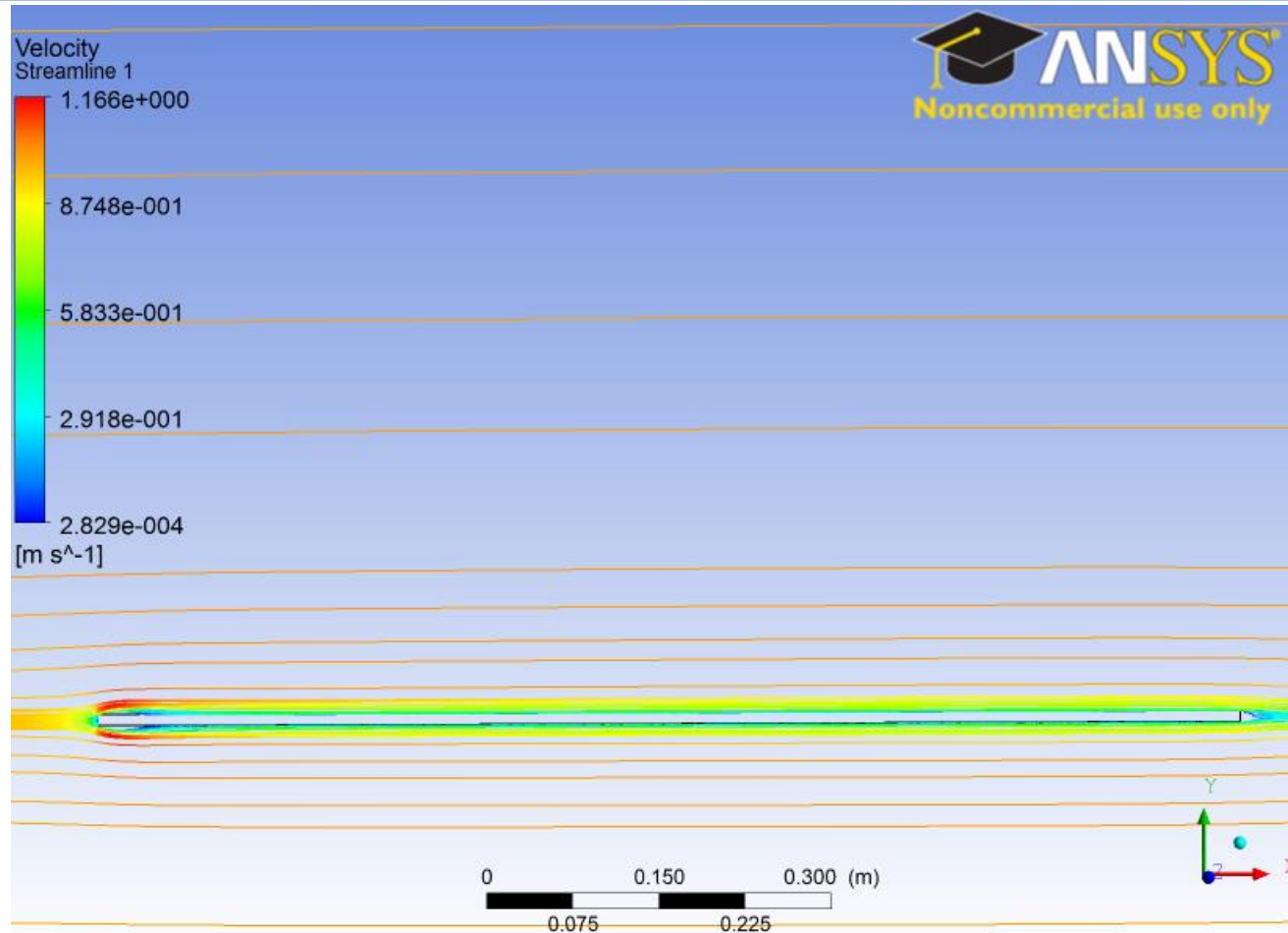
In der Vorlesung wird eine Methode auf der Basis von Gitterberechnungen und Gittermessungen vorgestellt. Dieses Verfahren wurde von H. Wolf entwickelt, siehe z.B. Wolf, H.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für Verdichtergitter. Maschinenbautechnik 12 (1963), Heft 8



Kräfte, die vom Fluid auf einen umströmten Körper ausgeübt werde:

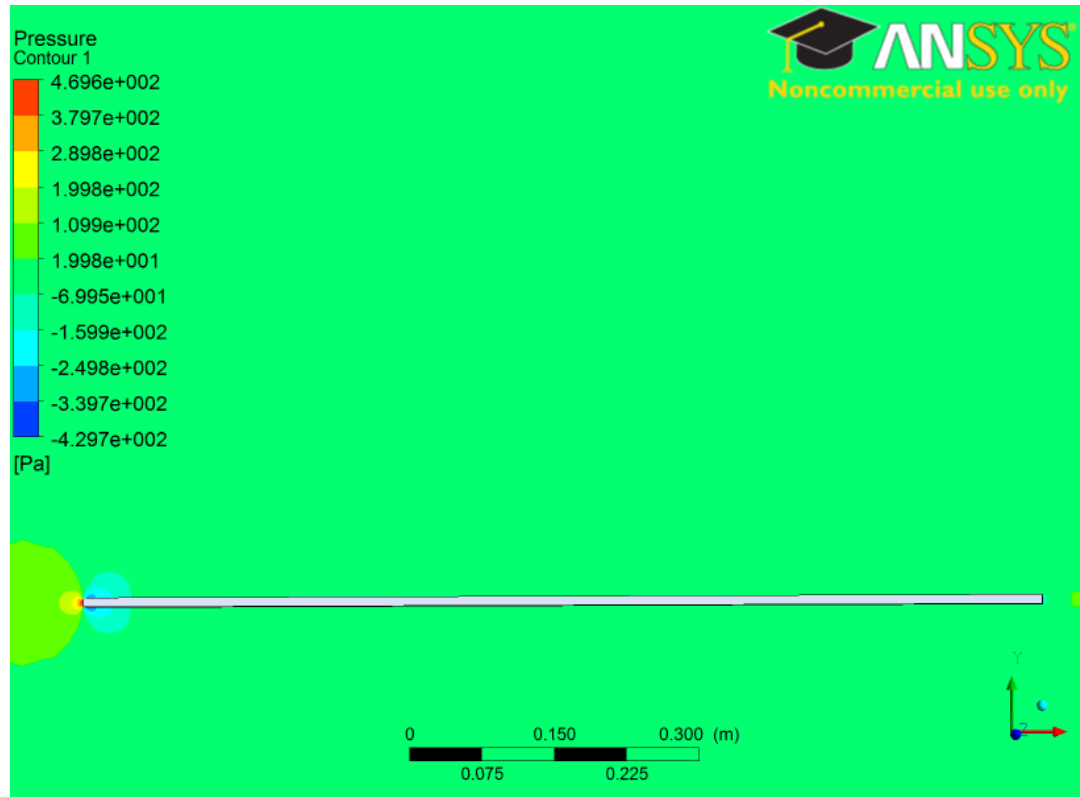
- Kraft parallel zur Anströmrichtung – Widerstandkraft
- Kraft senkrecht zur Anströmrichtung - Auftriebskraft

Strömung um eine ebene Platte

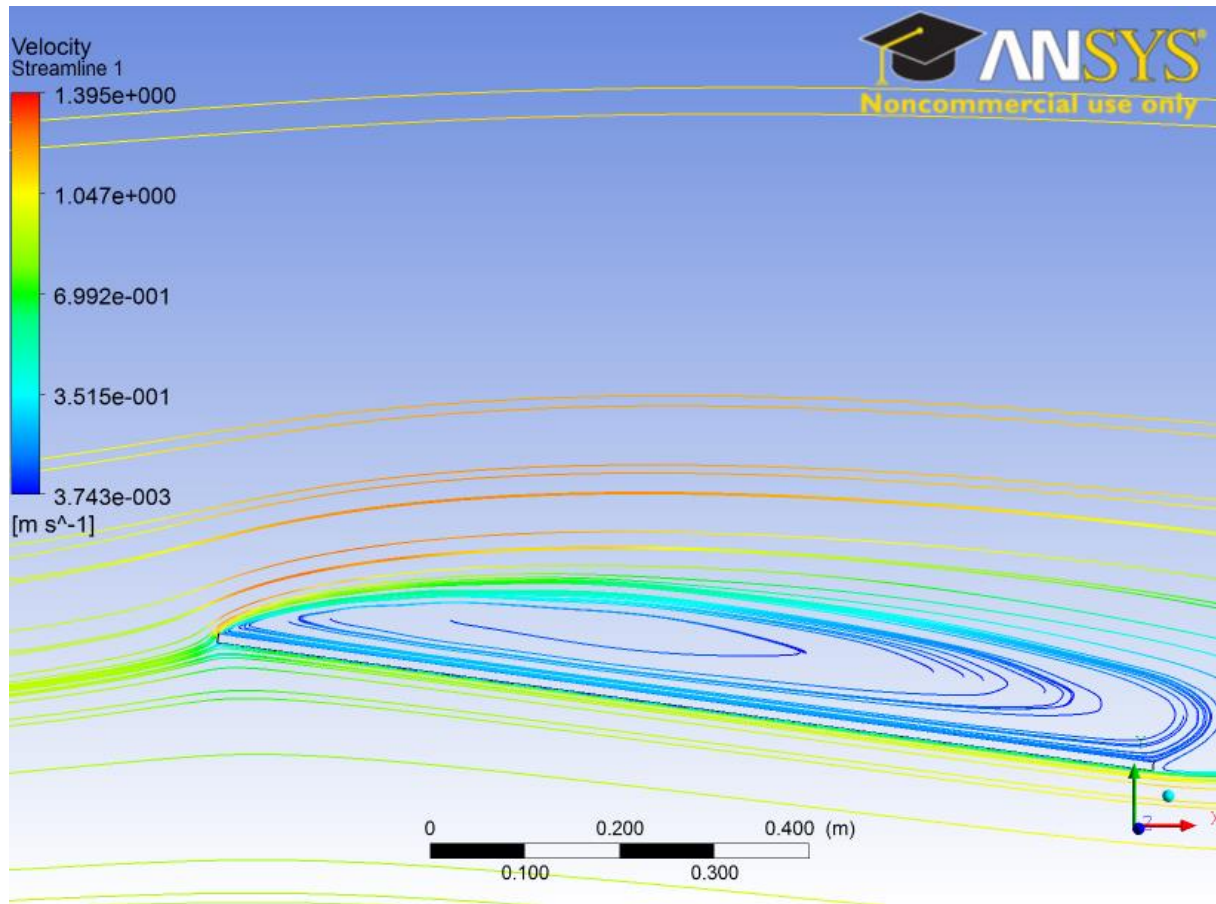


Stromlinien Anstellwinkel= 0 Grad

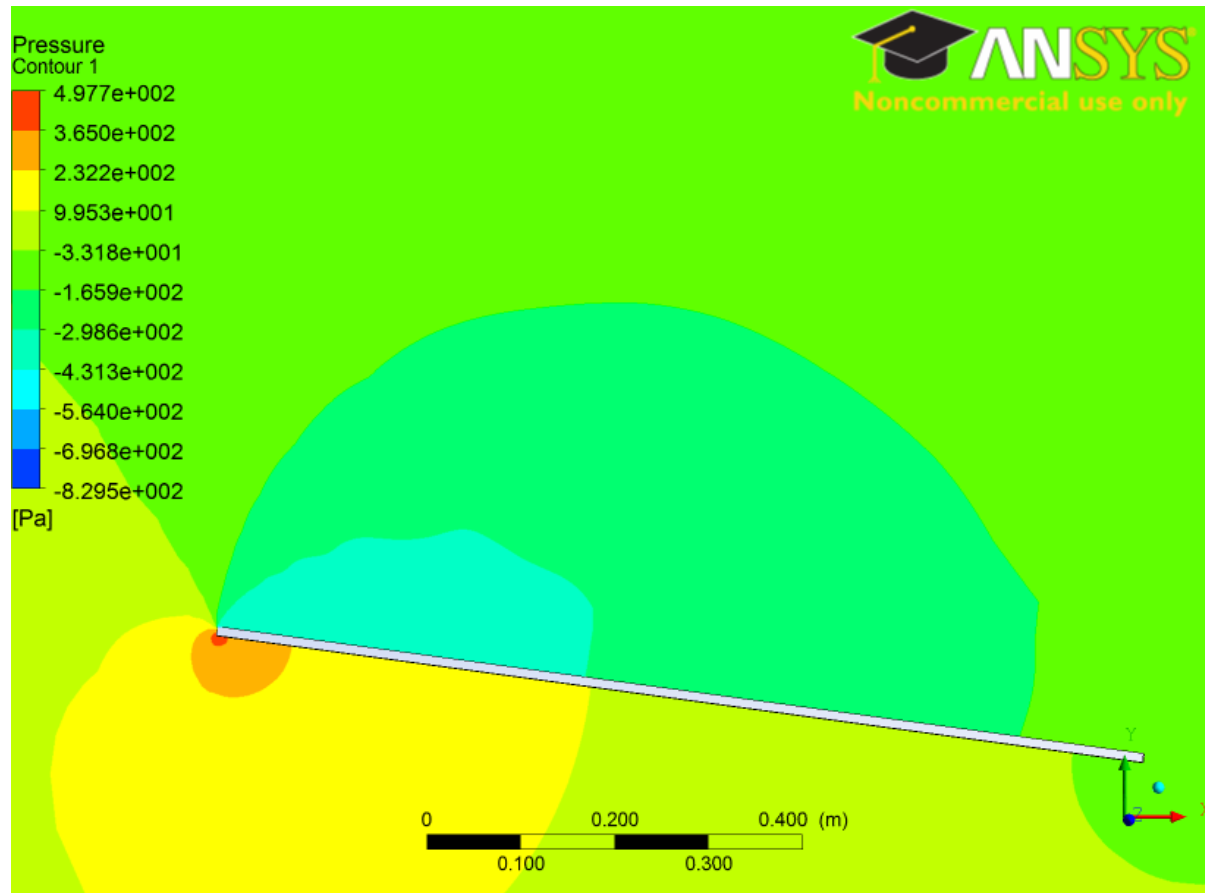
Strömung um eine ebene Platte



Statischer Druck Anstellwinkel= 0 Grad



Stromlinien Anstellwinkel= 8 Grad



Statische Druck Anstellwinkel= 8 Grad



- 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.



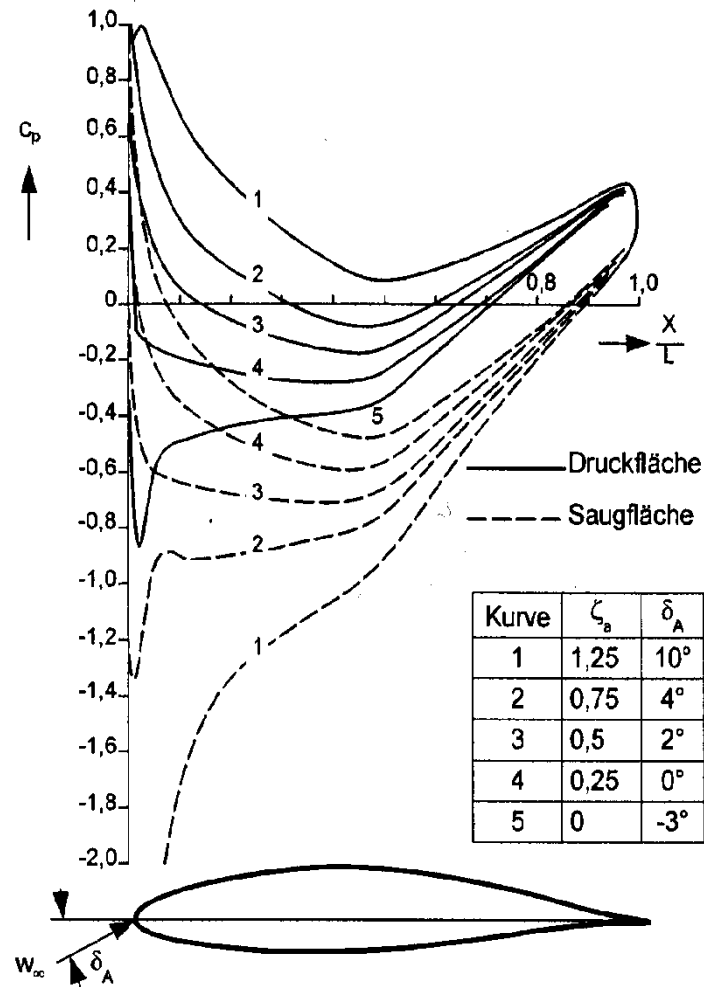
- Druckverteilung um das Profil
- Auftrieb als integraler Wert
- Widerstand als integraler Wert
- Moment
- Gleitwinkel

**Messung dieser Werte im Windkanal am Einzelprofil
oder im Gitterverband.**

Alternative wäre/ist die Berechnung aus Simulationen.

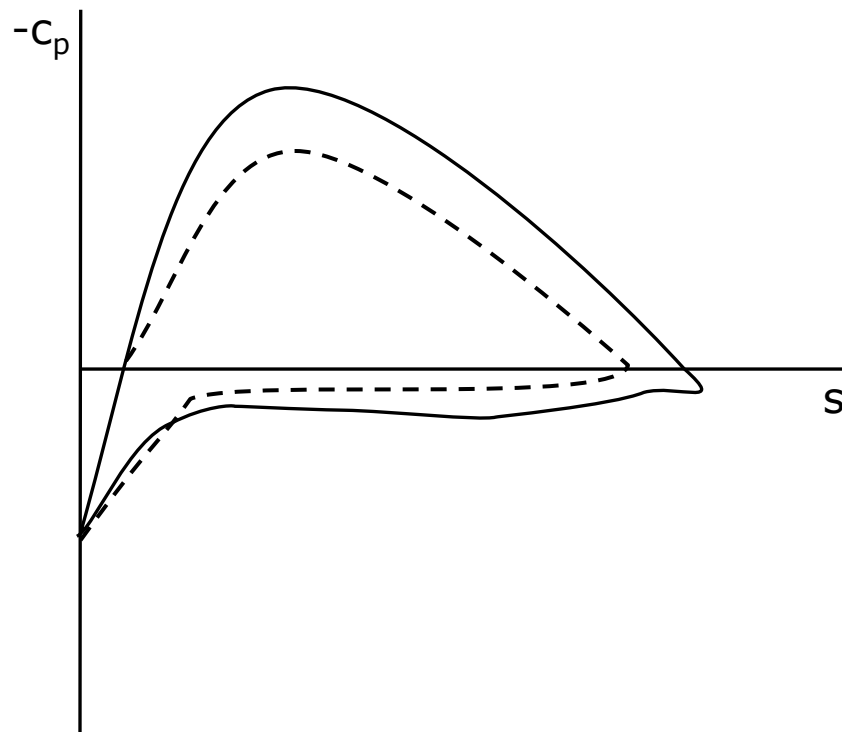
Druckverteilung um ein Tragflügelprofil, NACA 65₂-425

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} = \frac{p - p_\infty}{0.5 \cdot \rho \cdot c_\infty^2}$$



Quelle: J.F. Gülich "Kreiselpumpen"

Druckverteilung um ein Tragflügelprofil



Vergleich verschiedener Druckverteilungen um Tragflügel

üblicherweise werden die Widerstands- und die Auftriebskraft auf den Staudruck bezogen, es folgen

▪ für den Widerstandsbeiwert:
$$c_w = \frac{F_W}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

und für den Auftriebsbeiwert:
$$c_a = \frac{F_A}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

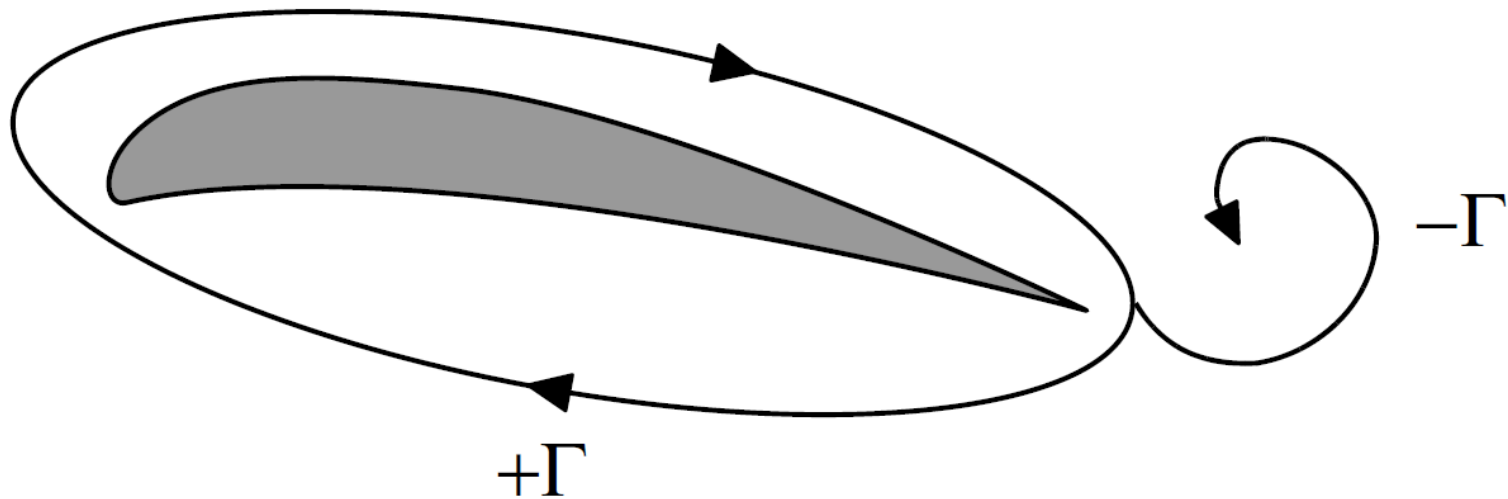
Auftriebskraft

$$F_A = \frac{\rho}{2} \cdot c_\infty^2 \cdot c_a \cdot b \cdot l_P$$

Widerstandskraft

$$F_W = \frac{\rho}{2} \cdot c_\infty^2 \cdot c_W \cdot b \cdot l_P$$

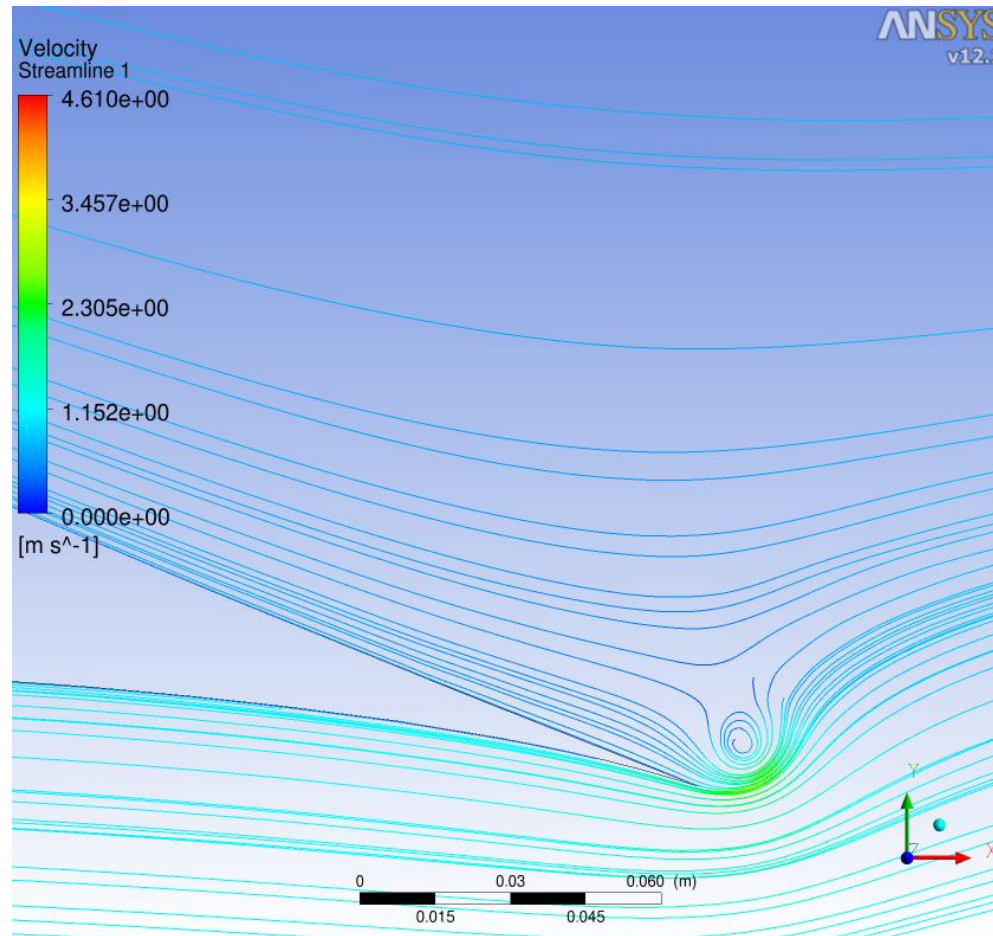
c_a und c_w werden beeinflusst von der Körperform, dem Anstellwinkel, der Reynoldszahl und der Wandrauheit



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

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

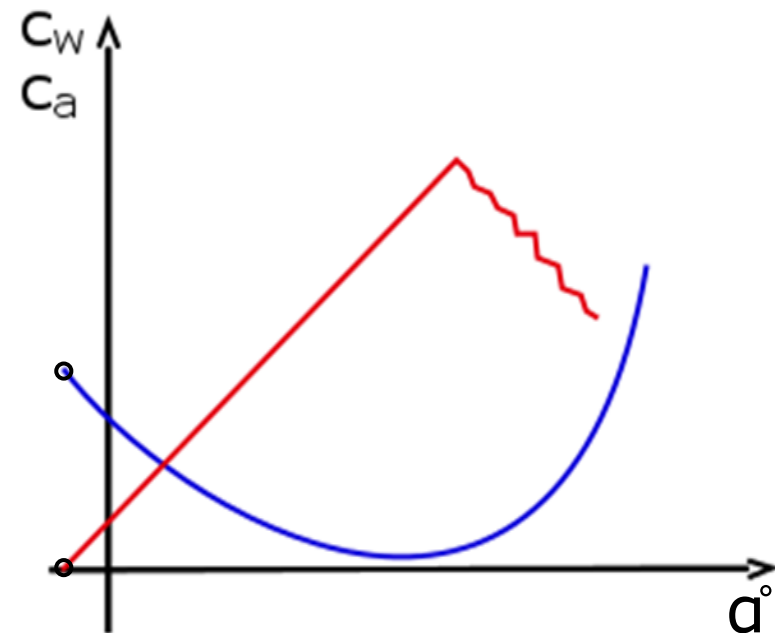
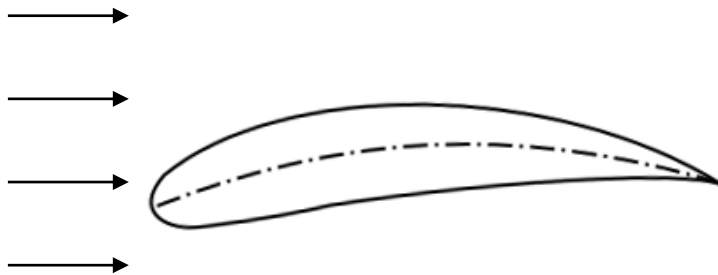
Auftriebskraft

(Satz von Kutta, Joukowski)

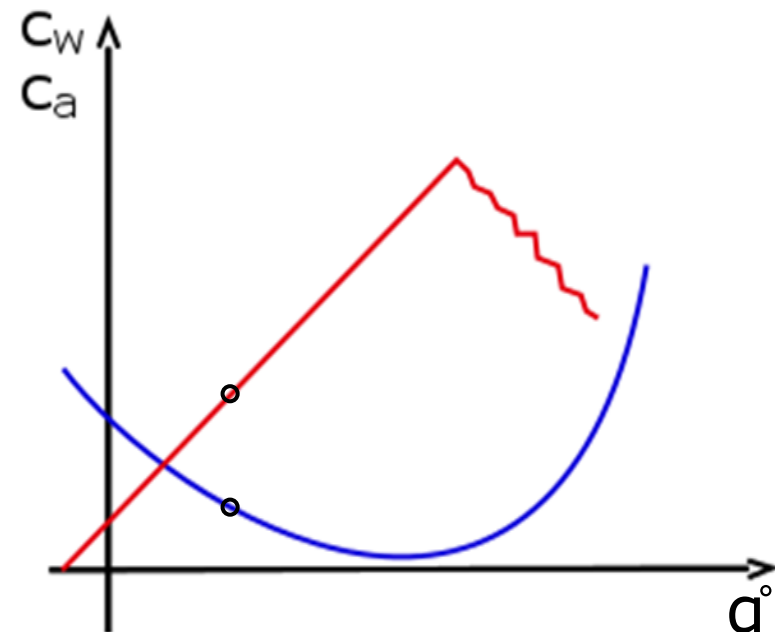
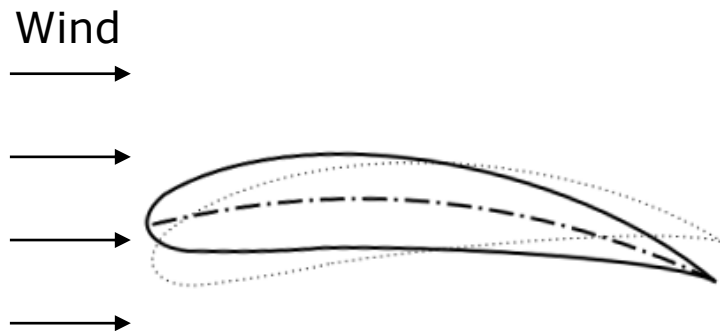
$$F_A = \rho \cdot c_{\infty} \cdot \Gamma \cdot b$$

Anstellung -3°

Zuströmung

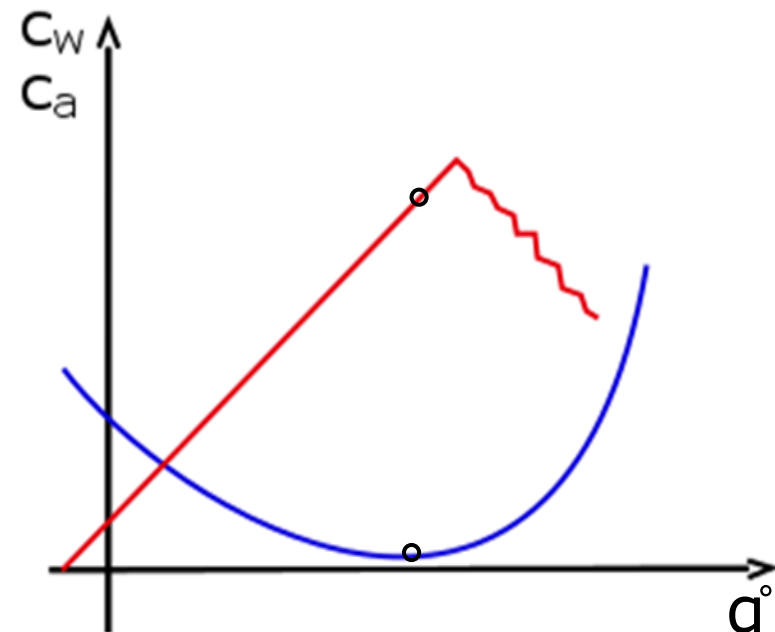
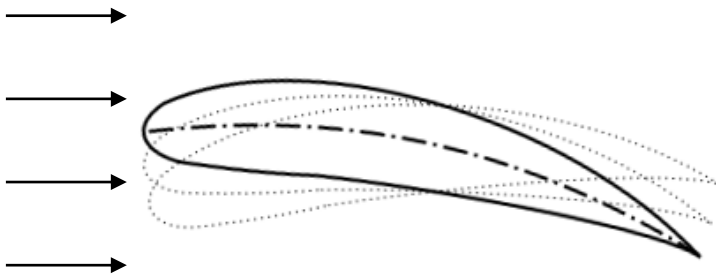


Anstellung 5°

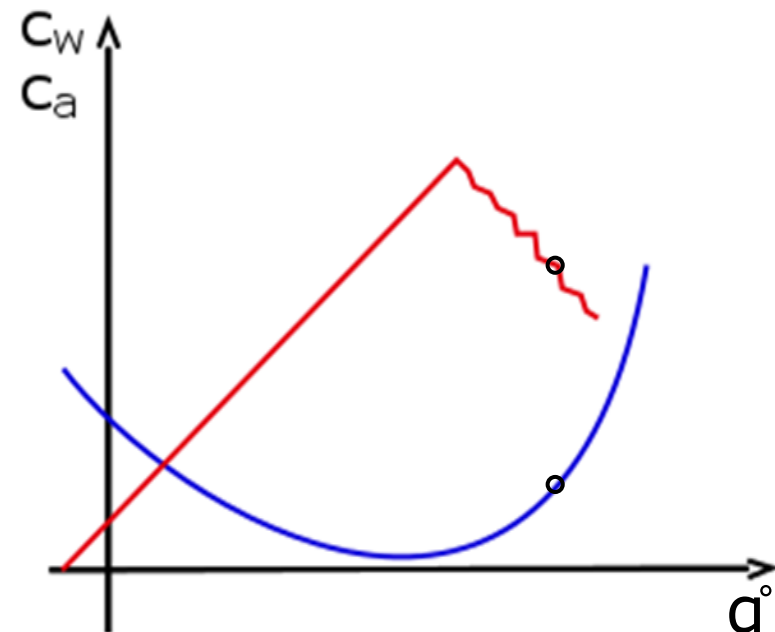
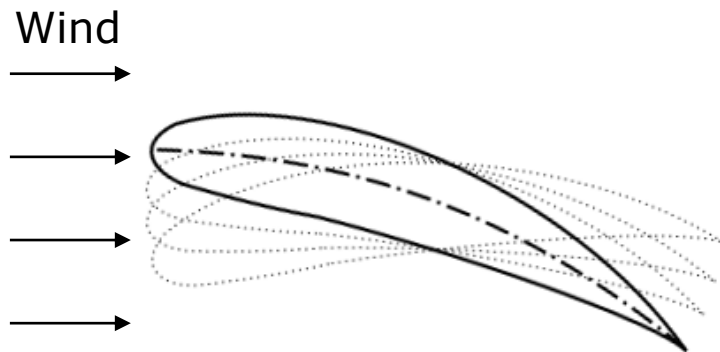


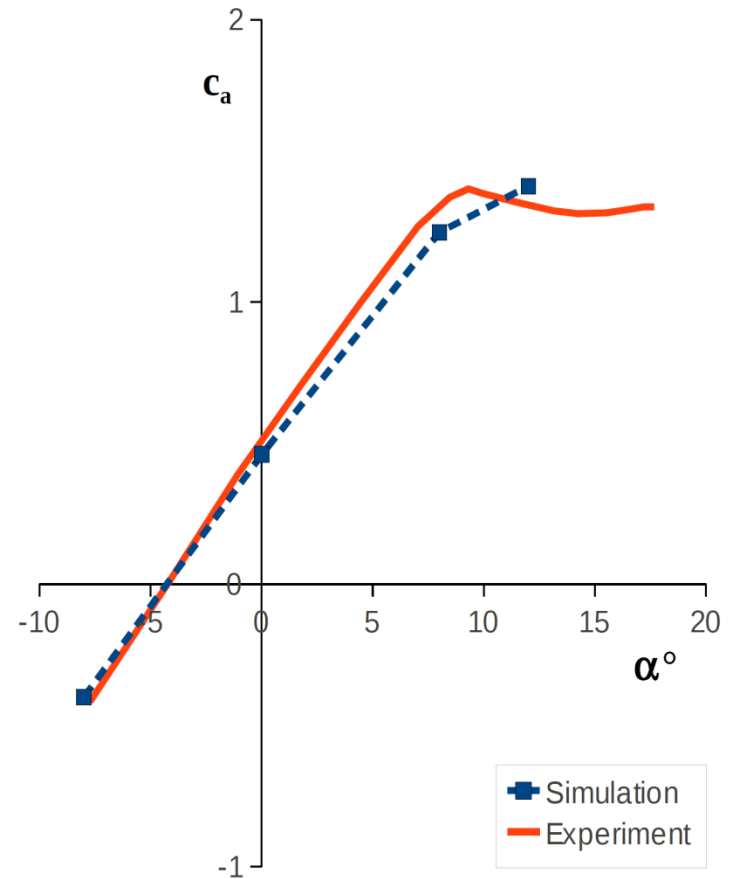
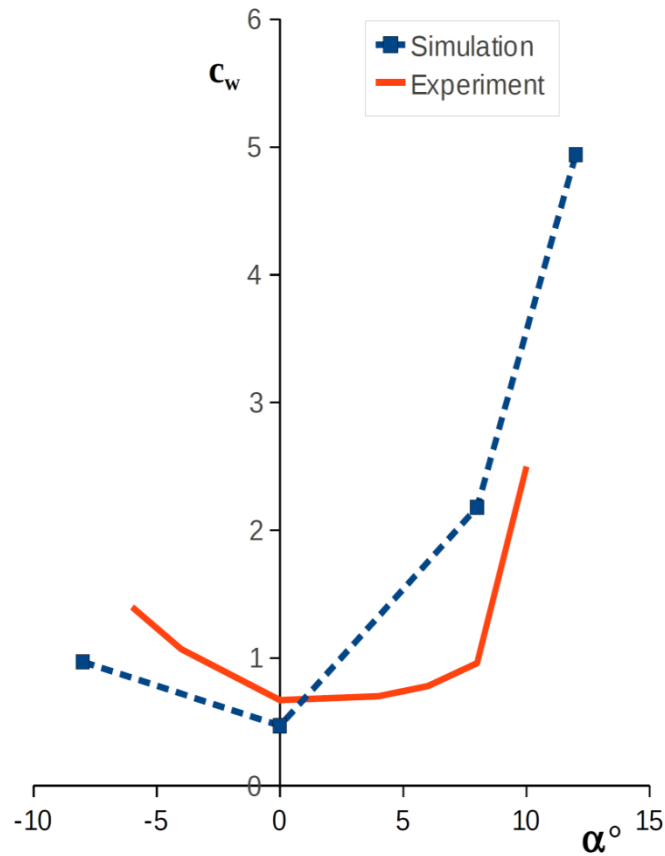
Anstellung 12°

Wind



Anstellung 20°







Moment

mit c_m als Momentenbeiwert

$$M = \frac{\rho}{2} \cdot c_\infty^2 \cdot c_m \cdot b \cdot l_P \cdot l_P$$

$$M \approx F_A \cdot s$$

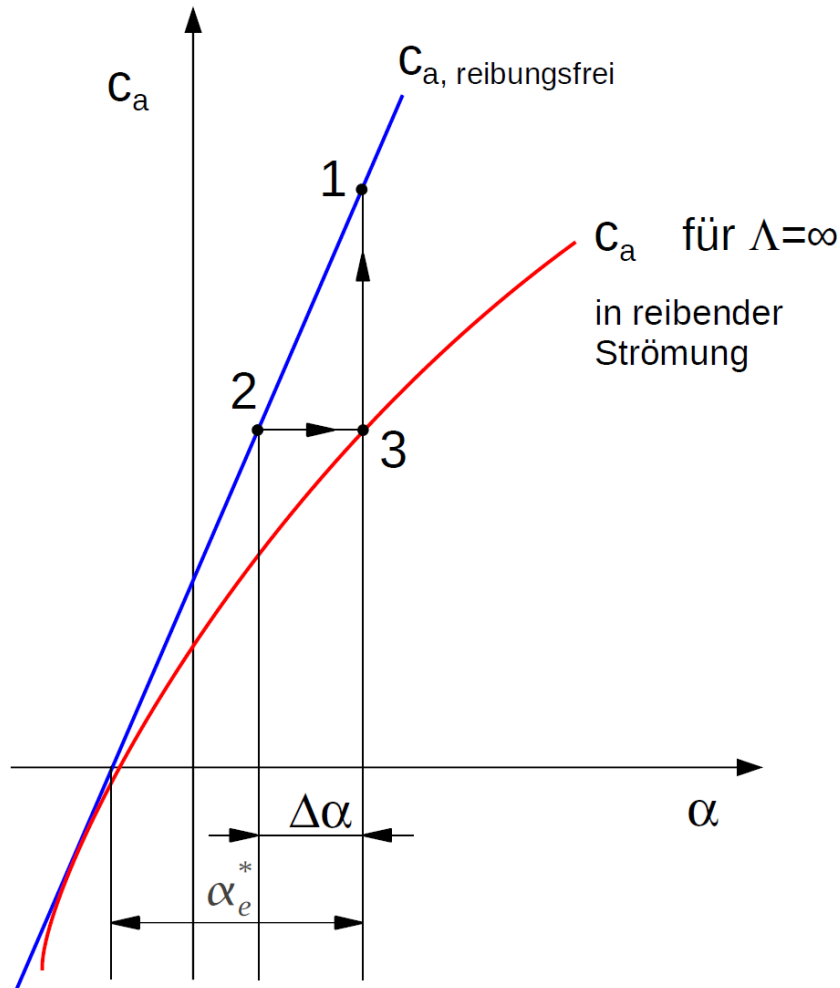
Abstand Profilspitze zum
Angriffspunkt der
Auftriebskraft

$$s \approx \frac{c_m}{c_a} \cdot l_P$$

Tragflügelprofile – Einfluss der Reibung



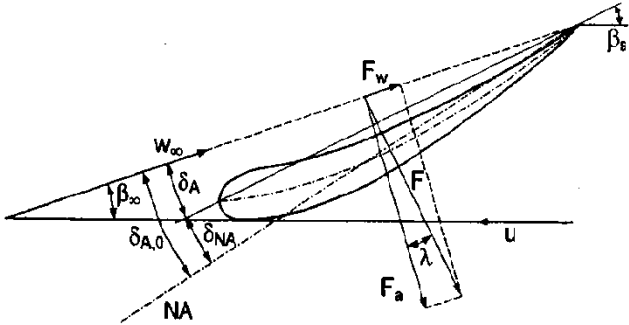
Profilumströmung – Einfluss der Reibung



Auftriebsbeiwert in idealer und reibungsbehafteter Strömung (nach Albring Abb. 6.13)

Kriterien für die Profilauswahl (siehe Gülich)

- geringe Unterdruckspitze – schlanke Profile
- große Dickenrücklage (40-50%)
- minimale Verluste bei breitem Betriebsbereich – spezielle Profilnasen
- mechanische Stabilität
- u.a.

Strömungsgrößen	Auftriebsbeiwert	$\zeta_a = \frac{F_a}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A_{fl}}$	7.4.1
	Widerstandsbeiwert	$\zeta_w = \frac{F_w}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A_{fl}}$	7.4.2
	Gleitzahl	$\varepsilon = \frac{F_w}{F_a} = \tan \lambda$	7.4.3
	Druckbeiwert	$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2} = 1 - \left(\frac{w}{w_\infty} \right)^2$	7.4.4
	Reynolds-Zahl	$Re = \frac{w_\infty L}{\nu}$	
	<p> F_a Auftrieb F_w Widerstand β_∞ Winkel der ungestörten Anströmung δ_A Anstellwinkel, bezogen auf Profilsehne $\delta_{A,0}$ Anstellwinkel, bezogen auf Nullauftriebsrichtung δ_{NA} Winkel der Nullauftriebsrichtung λ Gleitwinkel, $\lambda = \arctan \varepsilon$ w_∞ Anströmgeschwindigkeit </p>		

Quelle: J.F. Gülich
"Kreiselumpen"

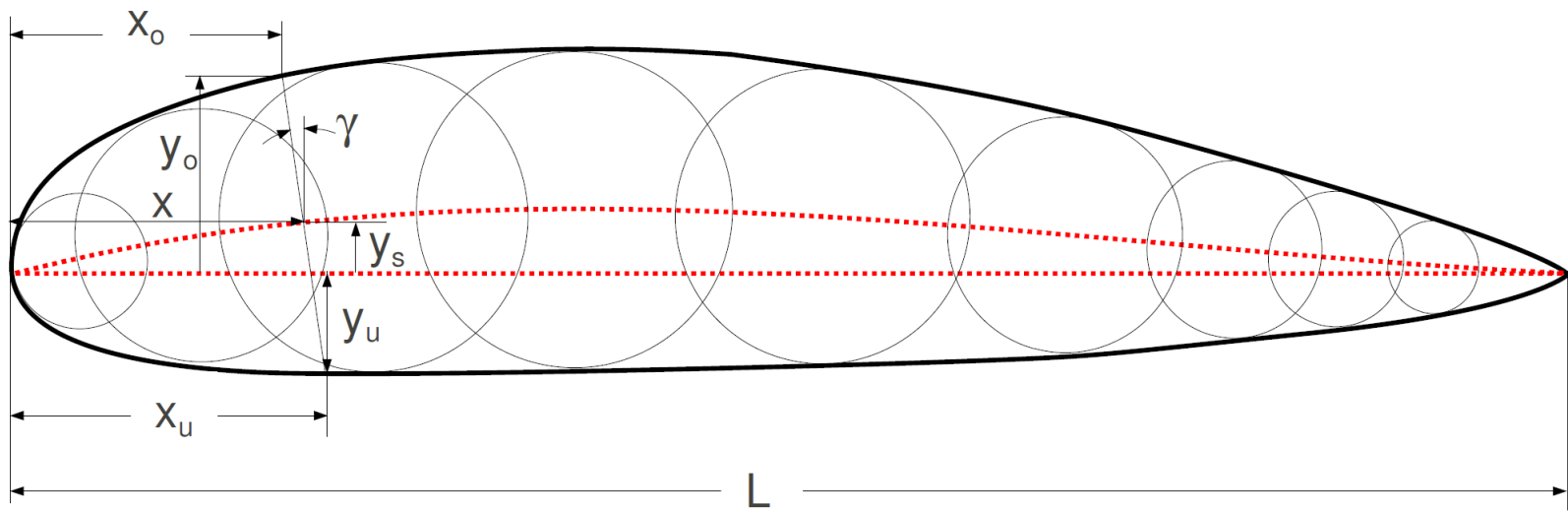


Nullauftriebsrichtung in Grad Bezugsrichtung: Profilschne Vorzeichen beachten !	$\delta_{NA} = -100 \frac{f}{L} \left\{ 0,82 + \frac{\left(\frac{x_f}{L}\right)^2}{1 + 5 \frac{d}{L}} \right\}$	7.4.5
Auftriebsbeiwert Profilwirkungsgrad: $\eta_P = 0,85$ bis $0,92$	$\zeta_a = 2\pi \eta_P \sin(\delta_A - \delta_{NA})$ $\zeta_a = \frac{d\zeta_a}{d\delta_A} (\delta_A - \delta_{NA})$	7.4.6
Minimalwert der Gleitzahl	$\epsilon_{min} \approx 0,012 + 0,02 \frac{d}{L} + 0,08 \frac{f}{L}$	7.4.7

Quelle: J.F. Gülich
"Kreispumpen"

- 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.



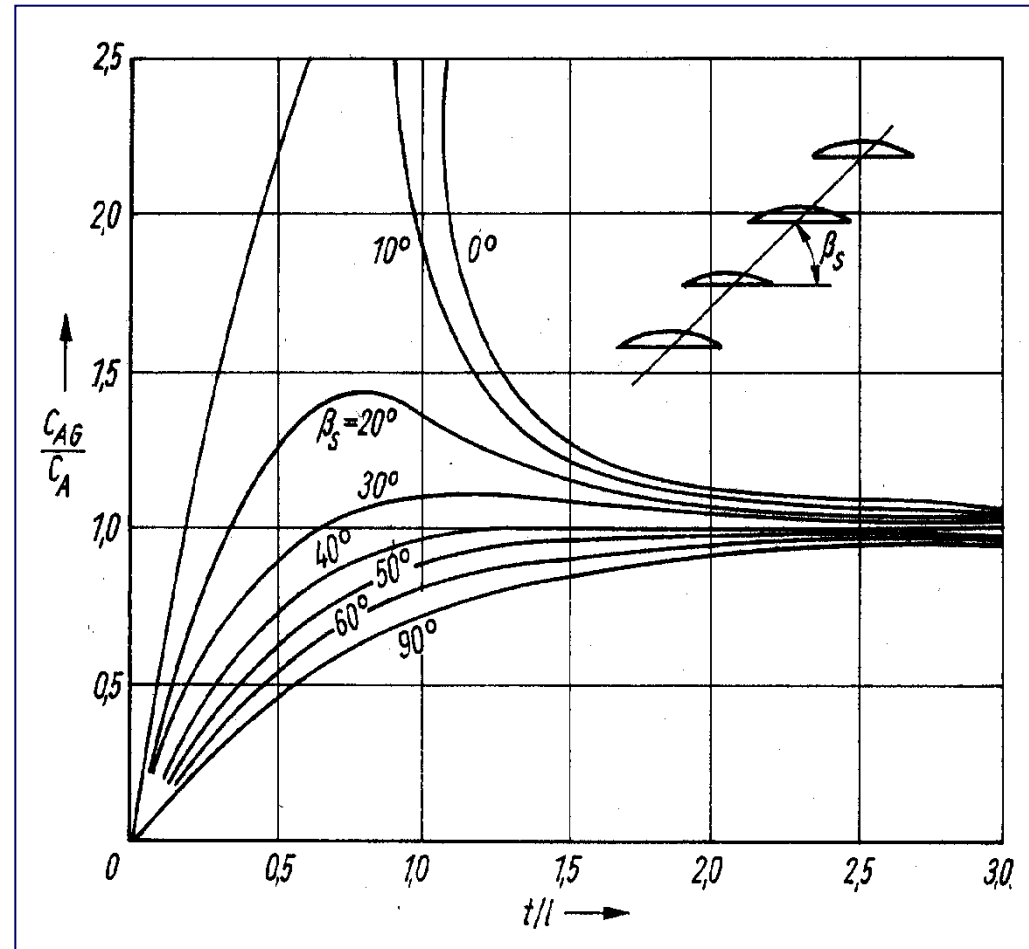
Oberseite (Saugseite): $x_{ob} = x - y^{(t)} \sin \gamma$, $y_{ob} = y^{(s)} + y^{(t)} \cos \gamma$
 Unterseite (Druckseite): $x_u = x + y^{(t)} \sin \gamma$, $y_u = y^{(s)} - y^{(t)} \cos \gamma$

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"

- **Verfahren von Wolf**

anwendbar für inkompressible Strömungen und kompressible Strömungen bis nahe zur kritischen Machzahl und schwach gewölbte Gitter (Umlenkung eines Gitters ändert sich bis zur kritischen Machzahl nur unwesentlich)

- **Gültigkeit:** Profile mit parabolischer Skelettlinie

$$0,6 < t/l < 2$$

- Wahl von $t/l_p \Rightarrow$ maximale Gitterbelastung beachten ($c_a \cdot l/t$)

Wahl von $d_p/l_p \Rightarrow$ notwendige Festigkeit beachten

$$(\text{Richtwert } d_p/l_p \leq 0,1)$$

- Wölbung

$$\Theta = \beta_2 - \beta_1$$

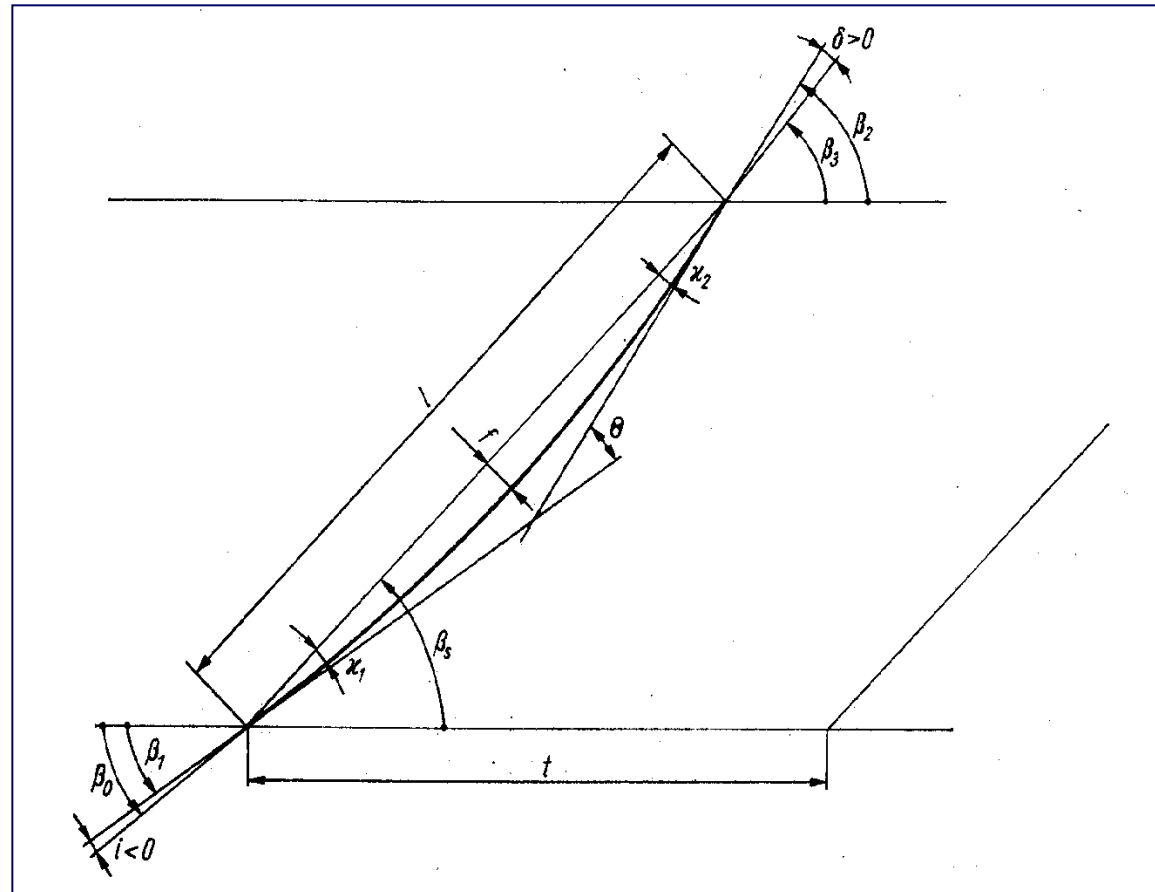
Winkelabweichung Eintritt

$$i = \beta_1 - \beta_0$$

Austritt

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

$$\Theta = \beta_3 - \beta_0 - i + \delta$$



Schaufel- und
Strömungswinkel
am Axialgitter

Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"

▪ Überlagerung der Eigenschaften eines

Skelettliniengitters (Index Sk)	($d/l=0$; $f/l \neq 0$)
Gitters aus ungewölbten Platten (Index Pl)	($d/l=0$; $f/l=0$)
Tropfengitters, ungewölbte Profile (Index D)	($d/l \neq 0$; $f/l=0$)

$$\Delta \beta = \Theta + i - \delta$$

Θ = Krümmungswinkel der Skelettlinie (Sk)

i = Winkel zwischen der Tangente der Sk am Eintritt und der Zuströmrichtung

δ = Minderumlenkung am Austritt

oder

$$\Delta \beta = \Theta + \Delta i + i^* - \delta \quad (1)$$

i^* gilt für aerodynamisch stoßfreie Umströmung

$$\delta = \delta^* + \delta_{pl} + \epsilon$$

δ^* = Minderumlenkung bei aerodynamisch stoßfreier Umströmung

δ_{pl} = Minderumlenkung des entsprechenden Plattengitters
($d/l=0$, $f/l=0$)

ϵ = Überlagerungsfehler

Tafelbild 3,4

- Werte für den stoßfreien Zustand

$$(2) \quad i^* = i^*_{sk} + i^*_{tr} + k_i$$

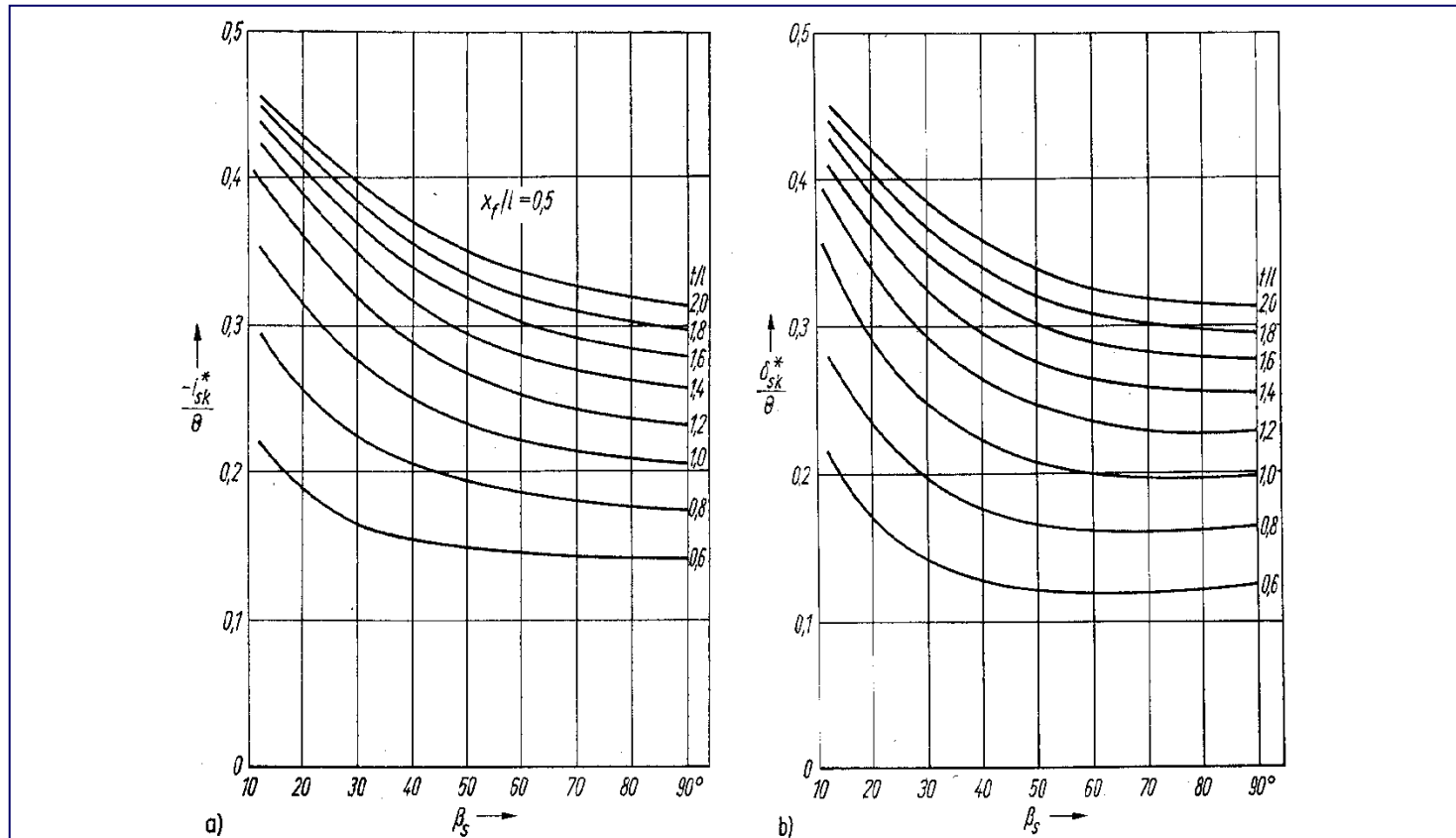
$$(2) \quad \delta^* = \delta^*_{sk} + \delta^*_{tr} + k_\delta$$

⇒ Überlagerung der Eigenschaften des unendlich dünnen Skelettliniengitters (sk) und des geraden Tropfengitters (tr).

k_i und k_δ kompensieren Überlagerungsfehler

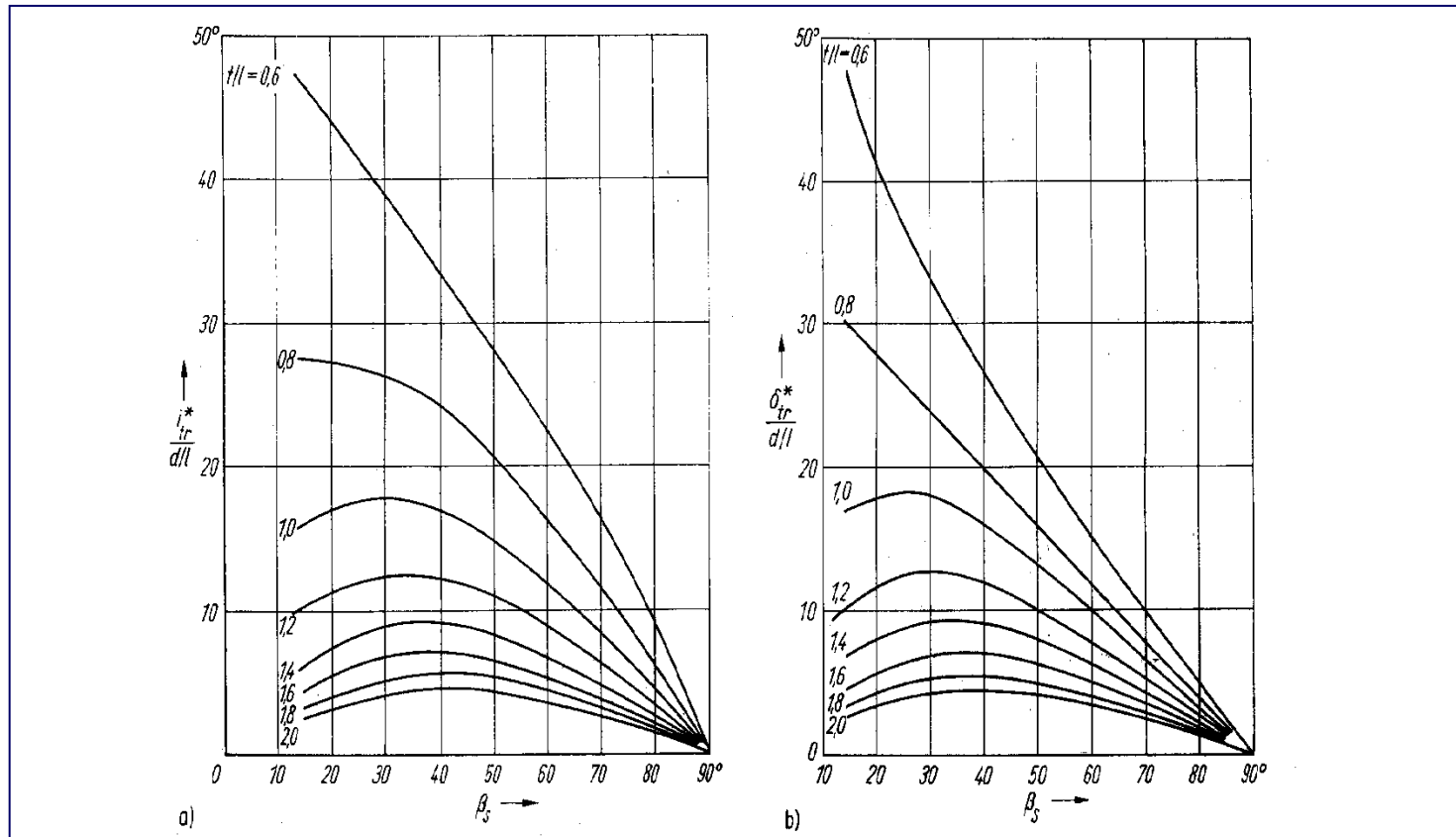
$$k_{i/\theta} = (0,00865 \beta_\delta - 0,101) d/l \quad \text{für } \beta_\delta = 50^\circ$$

k_δ kann im Allgemeinen vernachlässigt werden



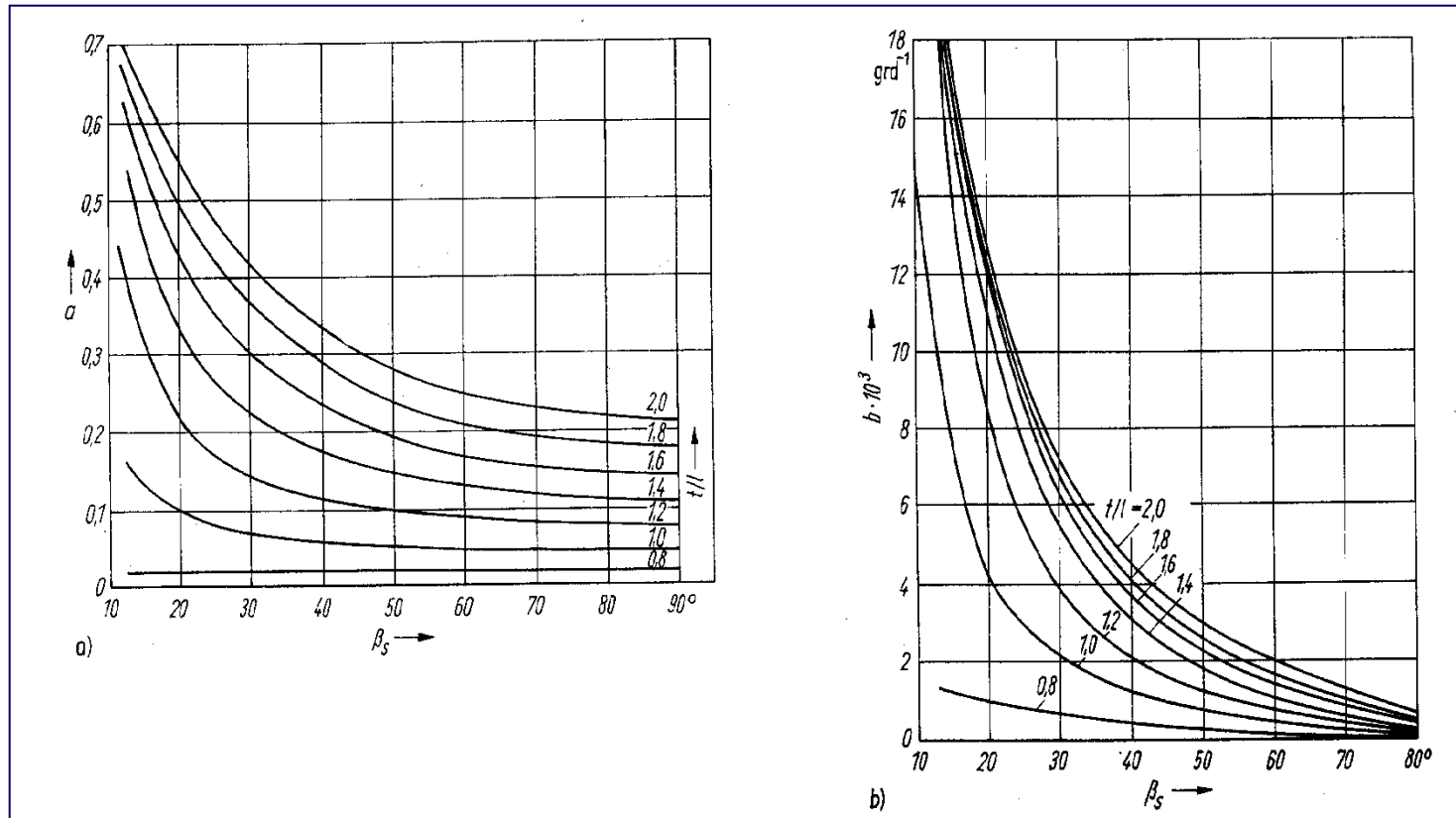
Winkelabweichungen bei aerodynamisch stoßfreier Anströmung von Skelettliniengittern
a) Eintrittswinkelabweichung; b) Minderablenkung

Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"



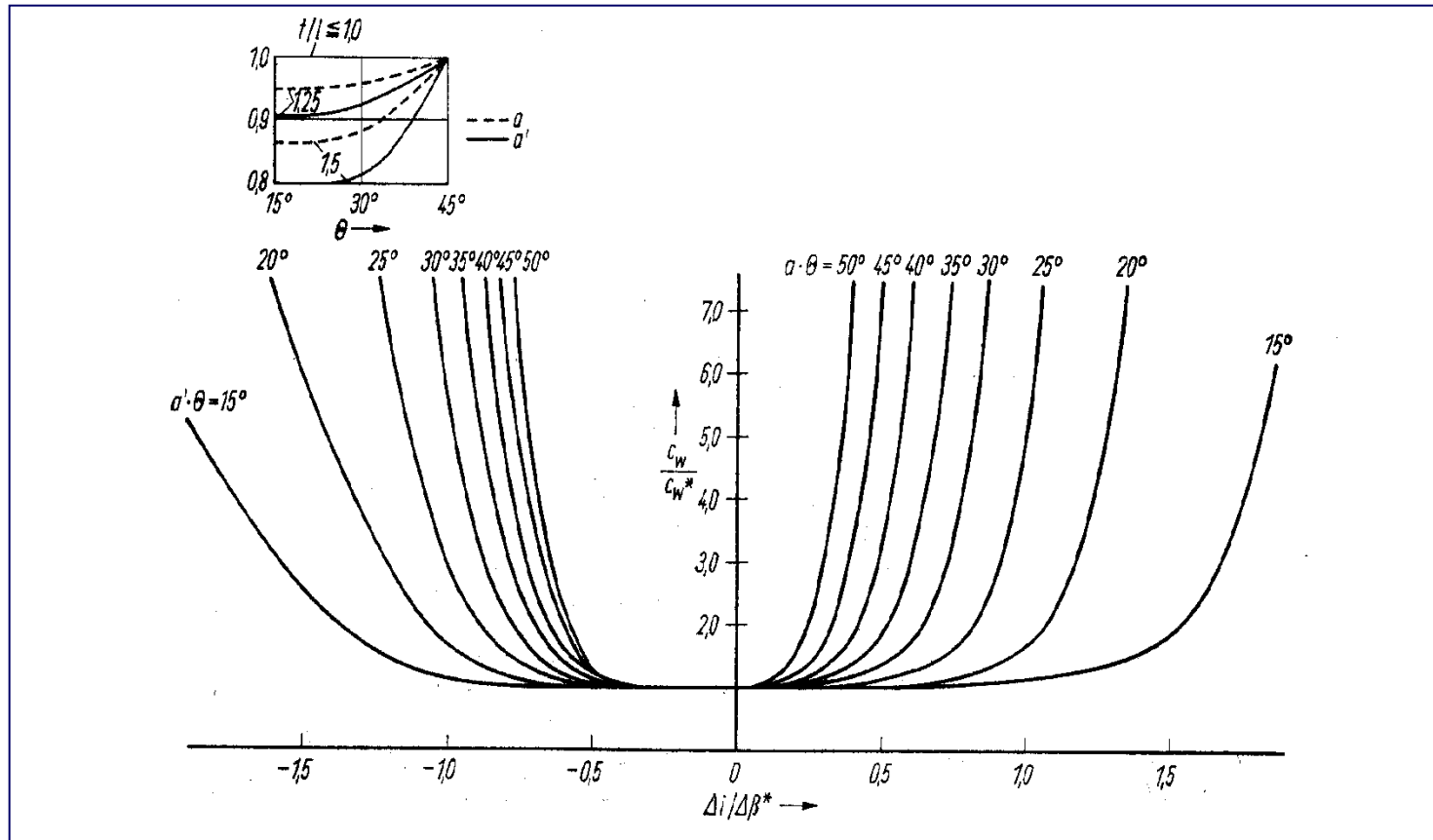
Winkelabweichungen bei aerodynamisch stoßfreier Anströmung von Tropfengittern a) Eintrittswinkelabweichung; b) Minderablenkung

Quelle: W. Pohlentz "Bauteile für Pumpen"



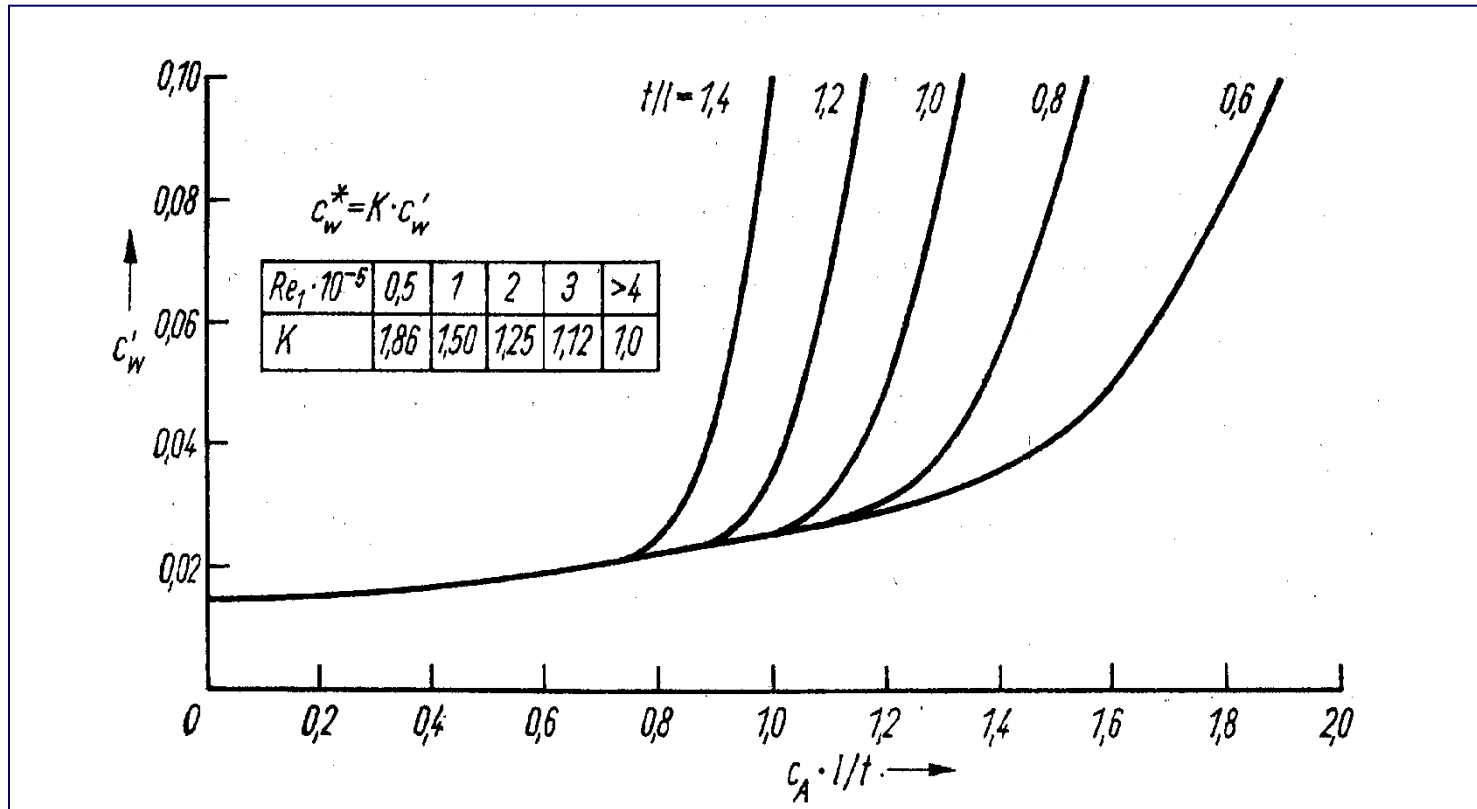
Konstanten zur Bestimmung der stoßbedingten Minderablenkung
nach Gl.: $\Delta\delta = a \Delta i + b (\Delta i)^2$

Quelle: W. Pohlentz "Bauteile für Pumpen"



Vergrößerung des Widerstandsbeiwertes mit dem Stoßwinkel

Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"



Widerstandsbeiwerte c_w^* bei aerodynamisch stoßfreier Zuströmung als Funktion der Gitterbelastung und des Teilungsverhältnisses

Quelle: W. Pohlentz "Bauteile für Pumpen"

Gleichung (2) in Gleichung (1) eingesetzt und nach der Wölbung aufgelöst

- Wölbung

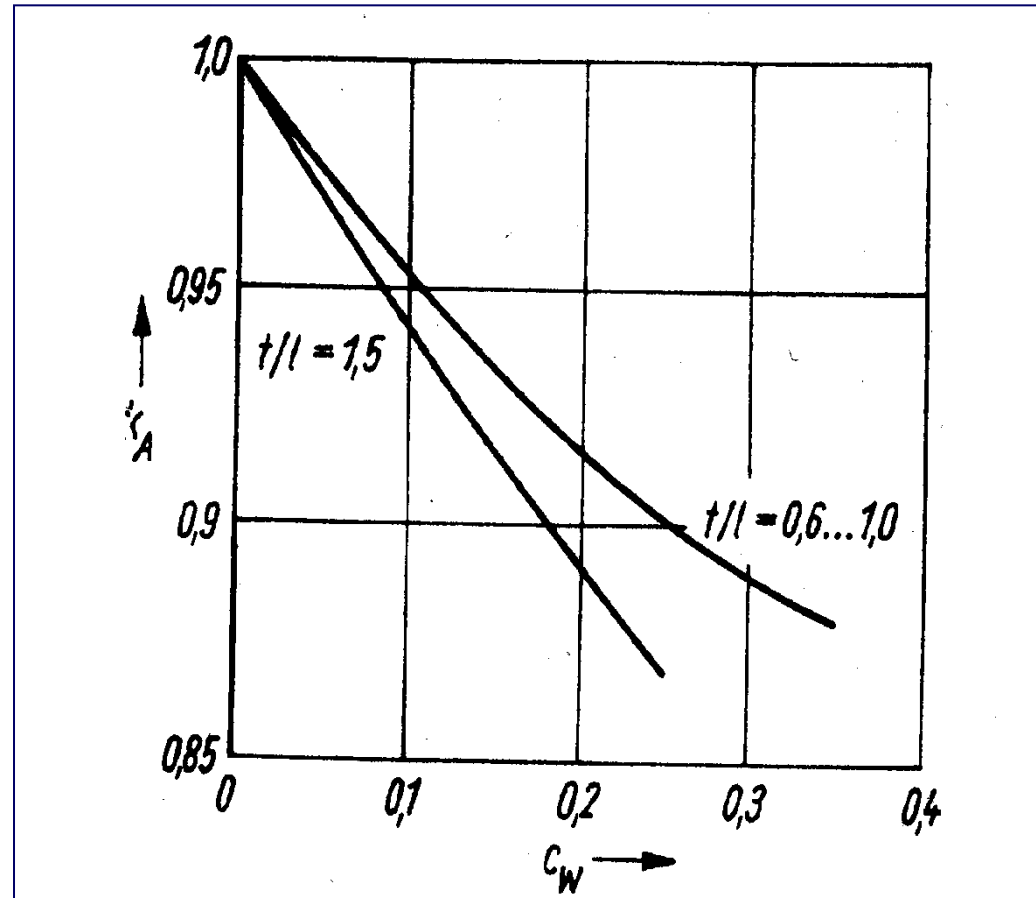
$$\Theta = \frac{\beta_3 - \beta_0 - i_{tr}^* - \Delta i + \delta_{tr}^* + \Delta \delta}{1 + \frac{i_{sk}^*}{\Theta} - \frac{\delta_{sk}}{\Theta} + \frac{k_i}{\Theta}}$$

- Startschätzung

$$\beta_s \approx \beta_\infty \approx \frac{(\beta_0 + \beta_3 + \Delta i)}{2}$$

$$\Theta \approx 1,1 \frac{(\beta_3 - \beta_0 - \Delta i)}{\left(1 + \frac{i_{sk}^*}{\Theta} + \frac{\delta_{sk}^*}{\Theta}\right)}$$

Tafelbild 5



Verminderung des
Zirkulationsbeiwerts
durch Profilreibung

Quelle: W. Pohlentz "Bauteile für Pumpen"

- Berücksichtigung des Einflusses der Profilreibung ($\beta_{3th} > \beta_3$)
⇒ Verringerung des Auftriebsbeiwertes $k_a = c_a/c_{ath}$

$$\cot \beta_{3th} = \frac{1}{k_a} [\cot \beta_3 - (1 - k_a) \cot \beta_1]$$

- Winkelabweichungen

$$i = i^* + \Delta i$$

$$\delta = \delta^* + \Delta \delta, \quad \Delta \delta = a \Delta i + b (\Delta i)^2$$

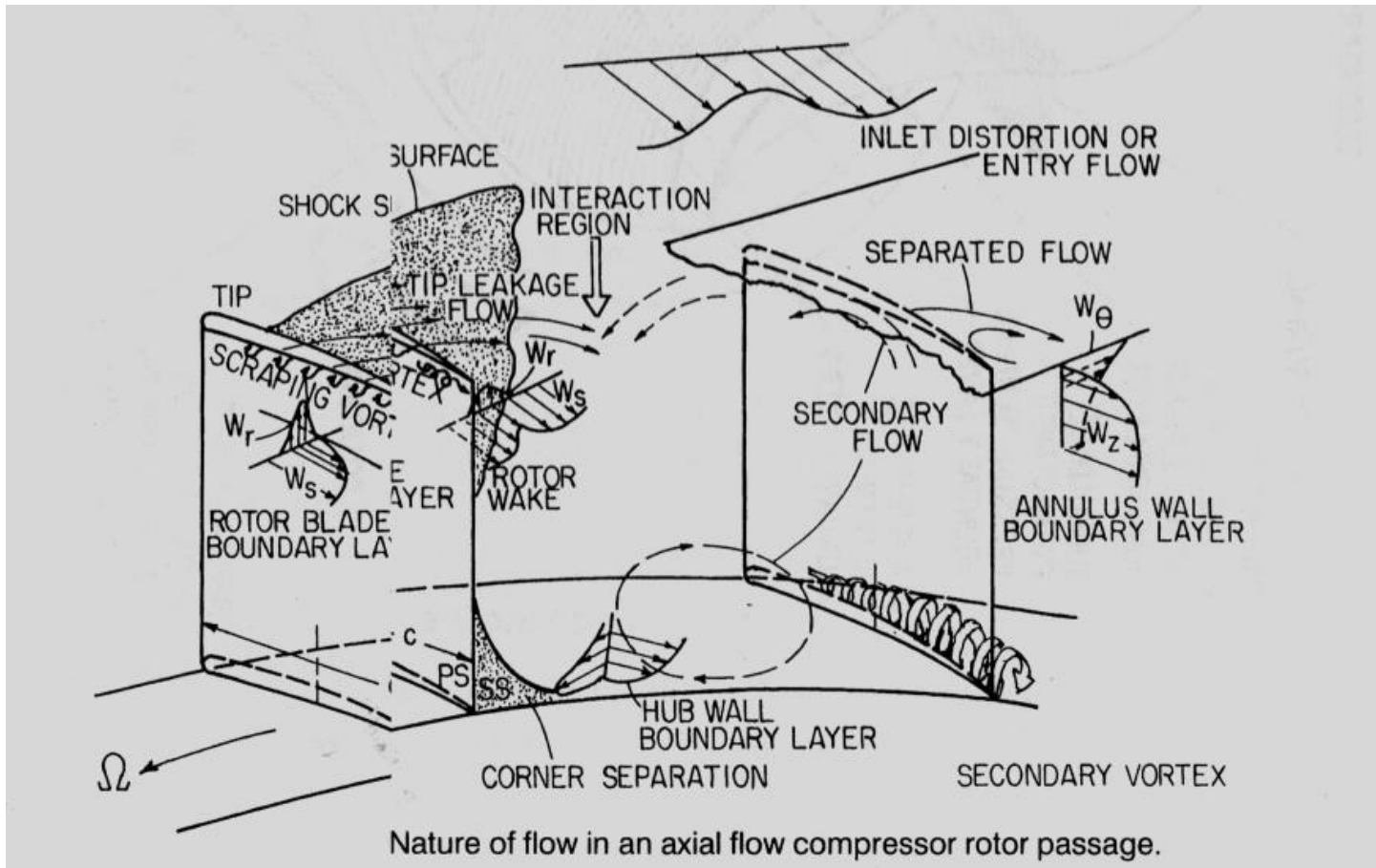
* - Werte: gelten für stoßfreie Zuströmung

Δ - Werte: berücksichtigen Stoßwinkel



$$\frac{f}{l} = \frac{1}{4 \tan \Theta} \left[\sqrt{1 + \frac{4x_f}{l} \left(1 - \frac{x_f}{l}\right) \tan^2 \Theta} - 1 \right]$$

$$\chi_1 = \frac{2f/l}{x_f/l} \qquad \chi_2 = \frac{2f/l}{1 - x_f/l}$$



Quelle: Lakshminarayana Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery