

Sommersemester 2011

Strömungsmaschinen II

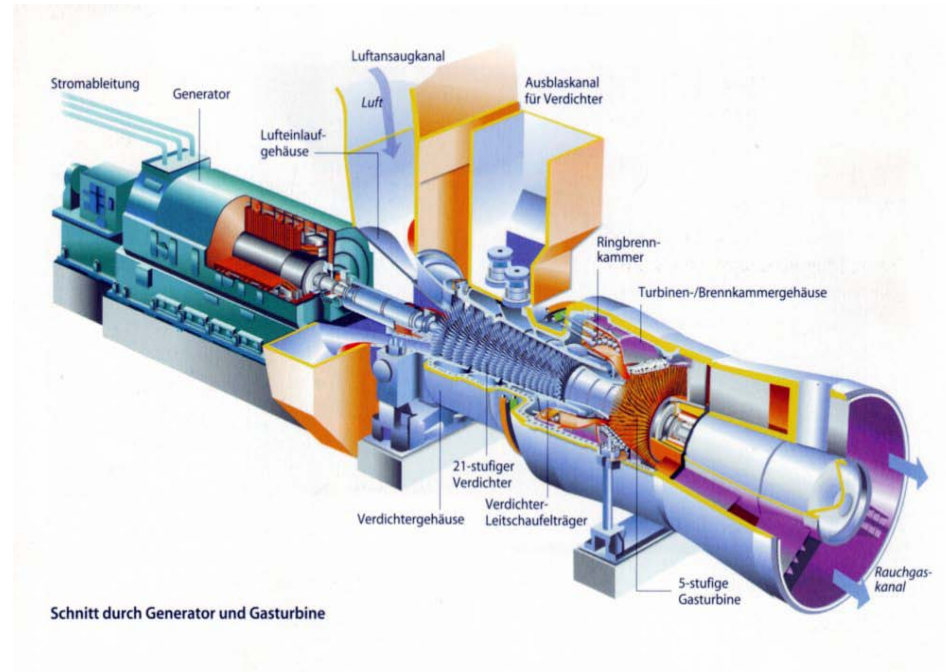
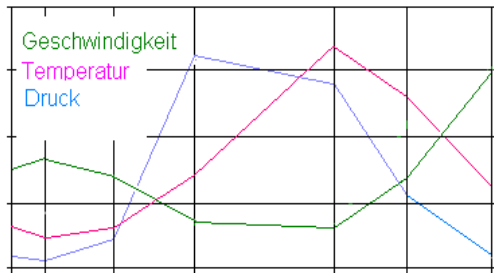
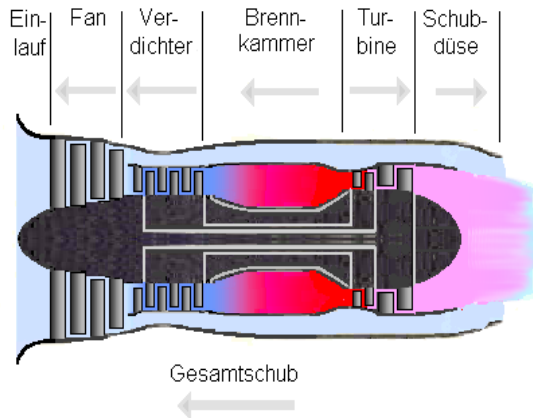
Thermische Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen



- Einführung / industrieller Hintergrund
- Thermodynamische und strömungstechnische Grundlagen
 - Zustandsänderungen, Kreisprozesse
 - Navier-Stokes-Gleichungen, Kontinuitätsgleichung
 - Überschallströmungen
- **Aufbau, Entwurf und Anwendung von Gasturbinen**
- Aufbau und Wirkungsweise von Flugtriebwerken
- Einführung in die Akustik
- Aufbau, Entwurf, Anwendung und Regelung von Dampfturbinen (Dr. Strenziok)
- Dynamik – Berechnung von Eigenfrequenzen

Prinzipieller Aufbau einer Gasturbine



Quelle: Wikipedia

T0

Quelle: www.hagelstein-consult.de



- Verdichtung von Gas aus einem Anfangszustand (p_{RS} , T_{RS}) auf den Enddruck p_{RD}

$$\text{Druckverhältnis} = \pi = \frac{p_{RD}}{p_{RS}}$$

- Radialverdichter
- Diagonalverdichter
- Axialverdichter

T1

- Verdichtung von Gasen in der Industrie
- als Turbolader in KFZ
- Verdichtung von Luft in Triebwerken und anderen Gasturbinen, die mit einem offenen Kreisprozess arbeiten
- Verdichtung des Gases in Gasturbinenanlagen, die mit einem geschlossenen Prozess arbeiten
- etc.

$$\pi_{\text{Fan}} \approx 1,5 \dots 1,7$$

$$\pi_v \approx 20 \dots 40$$

$$(\pi_{v\text{Stufe}} \approx 1,2 \dots 1,5)$$

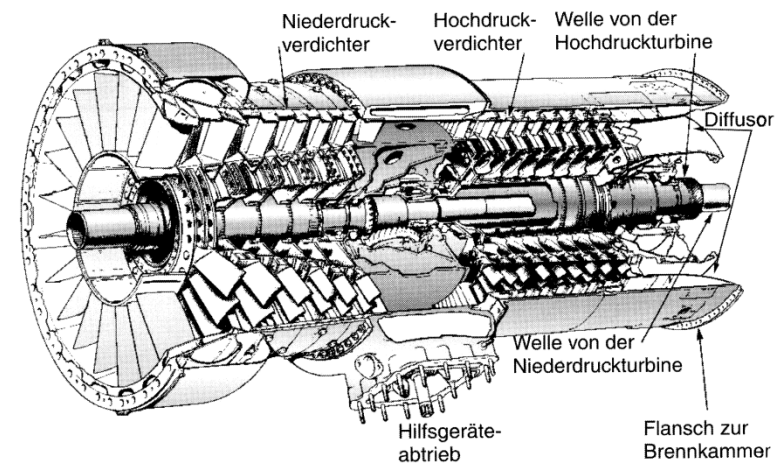
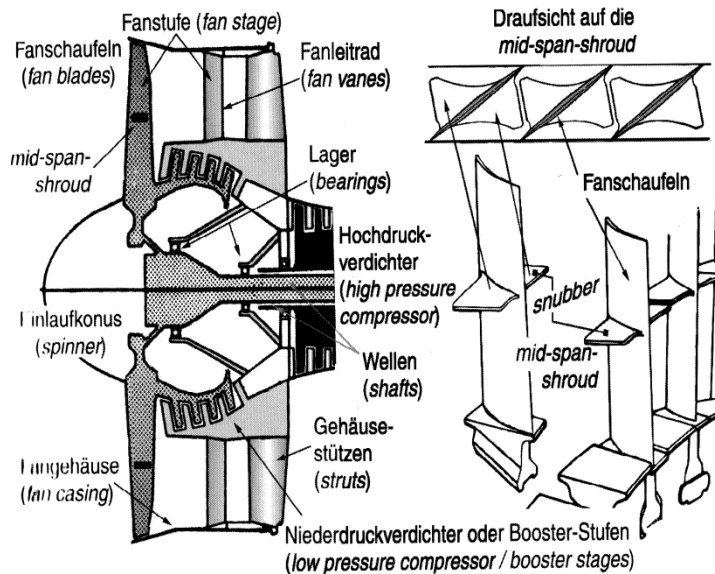


Bild 4-17: Beispiel für einen Mehrwellenverdichter (hier 2 Wellen): Rolls-Royce Tyne Turboprop (Transall C160). Basisbild mit freundlicher Genehmigung von Rolls-Royce plc

entnommen aus G.Bräunling: "Flugzeugtriebwerke"

Einwellenverdichter

- Alle Stufen sind auf einer Welle befestigt und rotieren demnach mit einer Drehzahl

Mehrwellenverdichter

- Verdichtung wird in Abschnitte geteilt
z.B. Niederdruck-, Mitteldruck-, Hochdruckteil
Antrieb durch verschiedene Turbinen mit jeweils eigener Welle und Drehzahl



- ▶ Verdichtung von Gas aus einem Anfangszustand (p_{RS}, T_{RS}) auf den Enddruck p_{RD}

$$\text{Druckverhältnis} = \pi = \frac{p_{RD}}{p_{RS}}$$

Annahme ideales Gas: $p_R = \rho_R \cdot R \cdot T_R$

$$\Delta h_R = c_p \cdot \Delta T_R$$

mit
$$\frac{T_{RD}}{T_{RS}} = \left(\frac{p_{RD}}{p_{RS}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot e^{\frac{s_D - s_S}{c_p}}$$

wird
$$\frac{M_k \cdot \omega}{\dot{m}} = c_p \cdot T_{RS} \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot e^{\frac{\Delta s}{c_p}} - 1 \right) + q$$

- Einflussgrößen: Eigenschaften des Gases
- Ansaugtemperatur
- Prozessführung ($\Delta s, q$)

T2,T3,T4

Energiebilanz, Annahme adiabate Verdichtung und Betrachtung eines Laufradelementes



$$\frac{\Delta M \cdot \omega}{\Delta \dot{m}} = \Delta h_R$$

$$\Delta M = \Delta \dot{m} (c_{u2} \cdot r_2 - c_{u1} \cdot r_1)$$

es folgt:

$$\Delta h_R = \omega (c_{u2} \cdot r_2 - c_{u1} \cdot r_1)$$



Entwurf von Axialmaschinen mit Gehäuse am Beispiel Verdichter

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

- subsonische Gitter
- transsonische Gitter (am Außenschnitt Überschallströmung

$$\text{Ma}_{\text{außen}} > 1,5,$$

an der Nabe Unterschallströmung)

strömungstechnischer Entwurf des Verdichters

- Festlegung der Hauptabmessungen
- Entwurf des Meridianschnitts
- Entwurf der Schaufeln von Lauf- und Leiträdern

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

Im weiteren 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

► Verfahren von Wolf

anwendbar für inkompressible Strömungen und kompressible Strömungen bis nahe zur kritischen Machzahl und schwach gewölbte Gitter



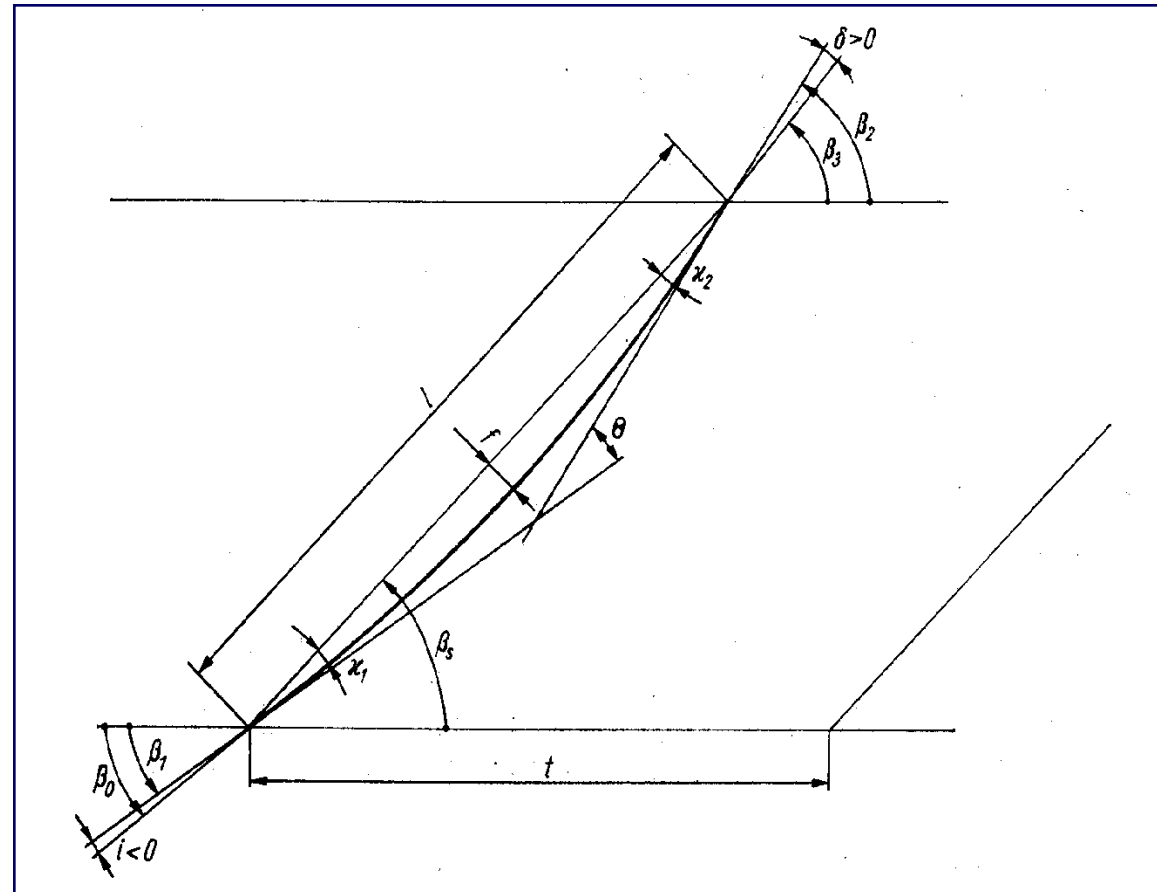
► Überlagerung der Eigenschaften eines

Skelettliniengitters $(d/l=0 ; f/l \neq 0)$

Gitters aus ungewölbten Platten $(d/l=0 ; f/l=0)$

Tropfengitters $(d/l \neq 0 ; f/l=0)$

Schaufel- und
Strömungswinkel
am Axialgitter



Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"

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

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

Verfahren von Wolf

- ▶ Werte für den stoßfreien Zustand

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

$$(2) \quad d^* = d^*_{sk} + d^*_{tr} + k_d$$

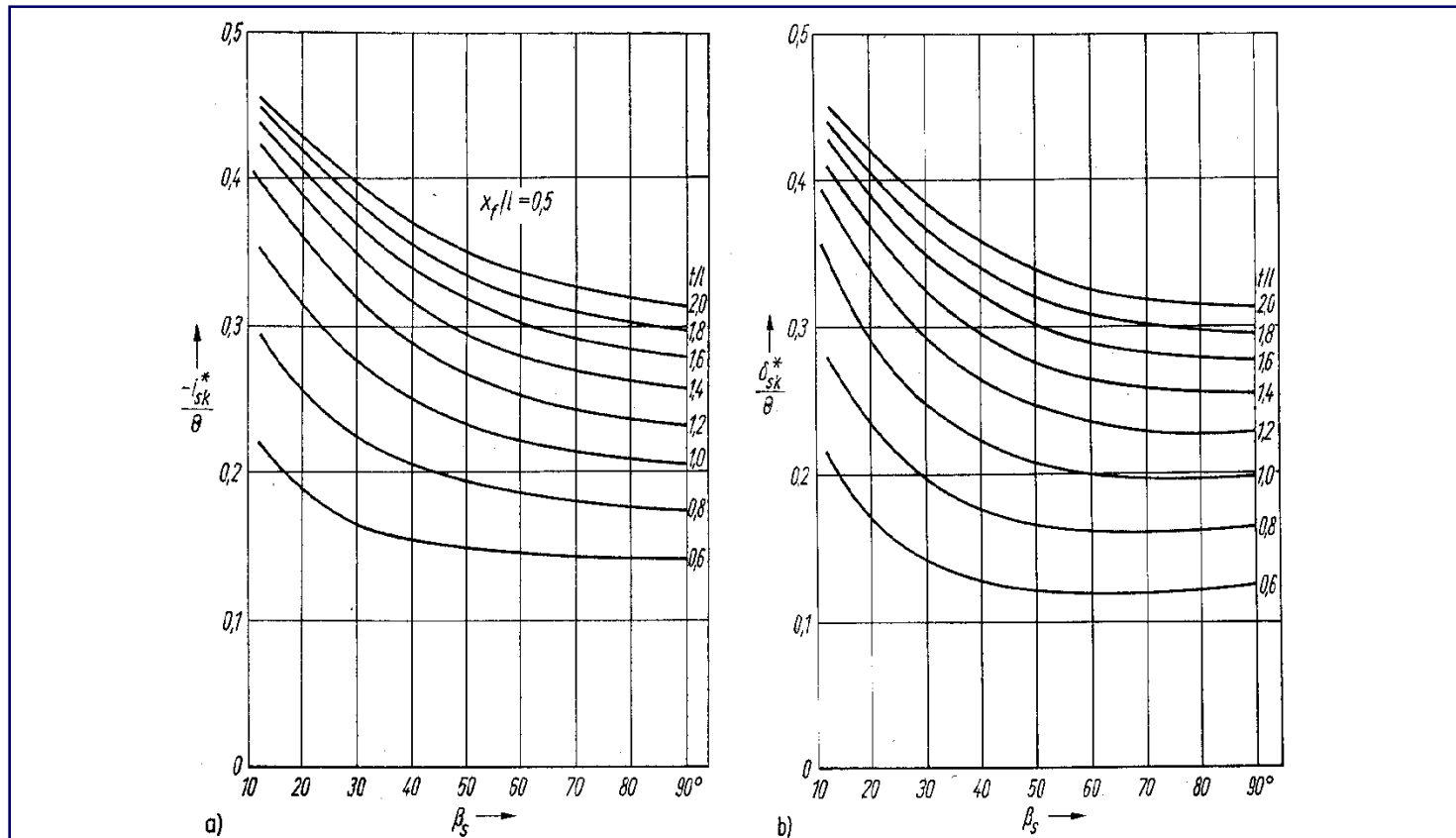
⇒ Überlagerung der Eigenschaften des unendlich dünnen Skelettliniengitters (sk) und des geraden Tropfengitters (tr).

k_i und k_d kompensieren Überlagerungsfehler

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

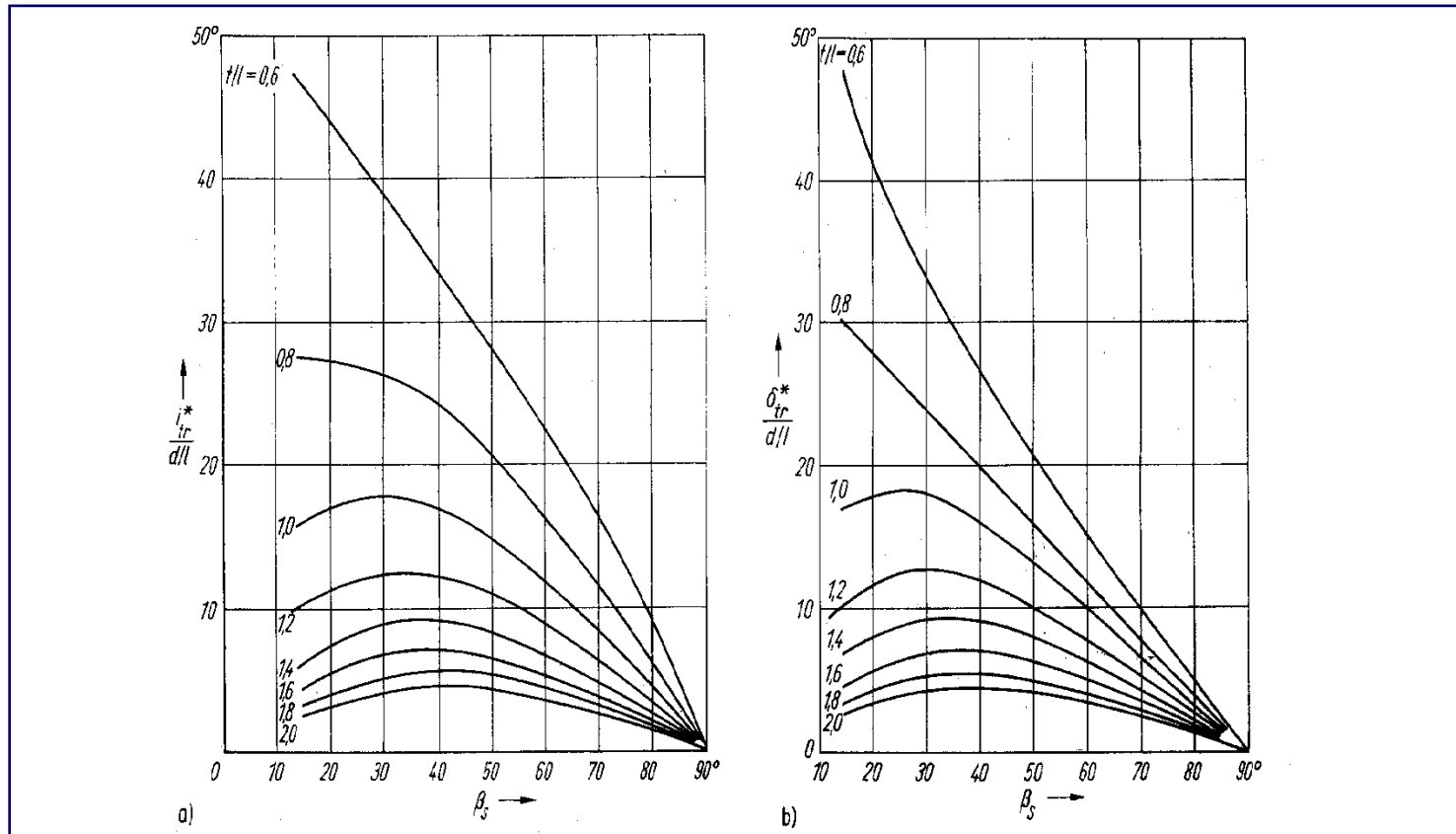
k_d kann im Allgemeinen vernachlässigt werden

T7



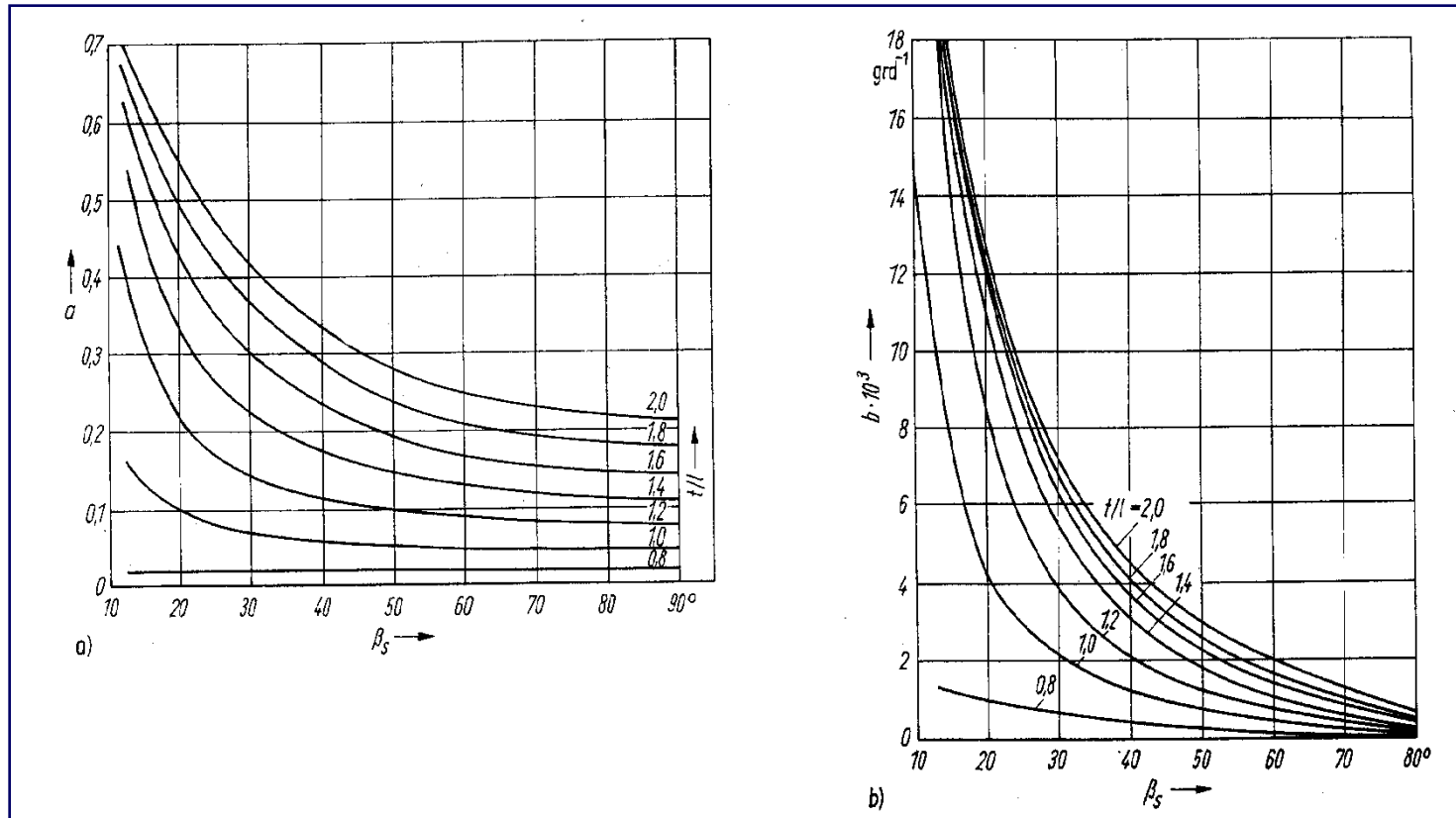
Winkelabweichungen bei aerodynamisch stoßfreier Anströmung von Skelettliniengittern
a) Eintrittswinkelabweichung; b) Minderablenkung

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.: $Dd = a Di + b (Di)^2$

Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"

- ▶ **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
(*Richtwert* $d_p/l_p \leq 0,1$)

- ▶ Wölbung

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

Winkelabweichung Eintritt
Austritt

$$i = \beta_1 - \beta_0$$

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

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

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

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

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

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

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

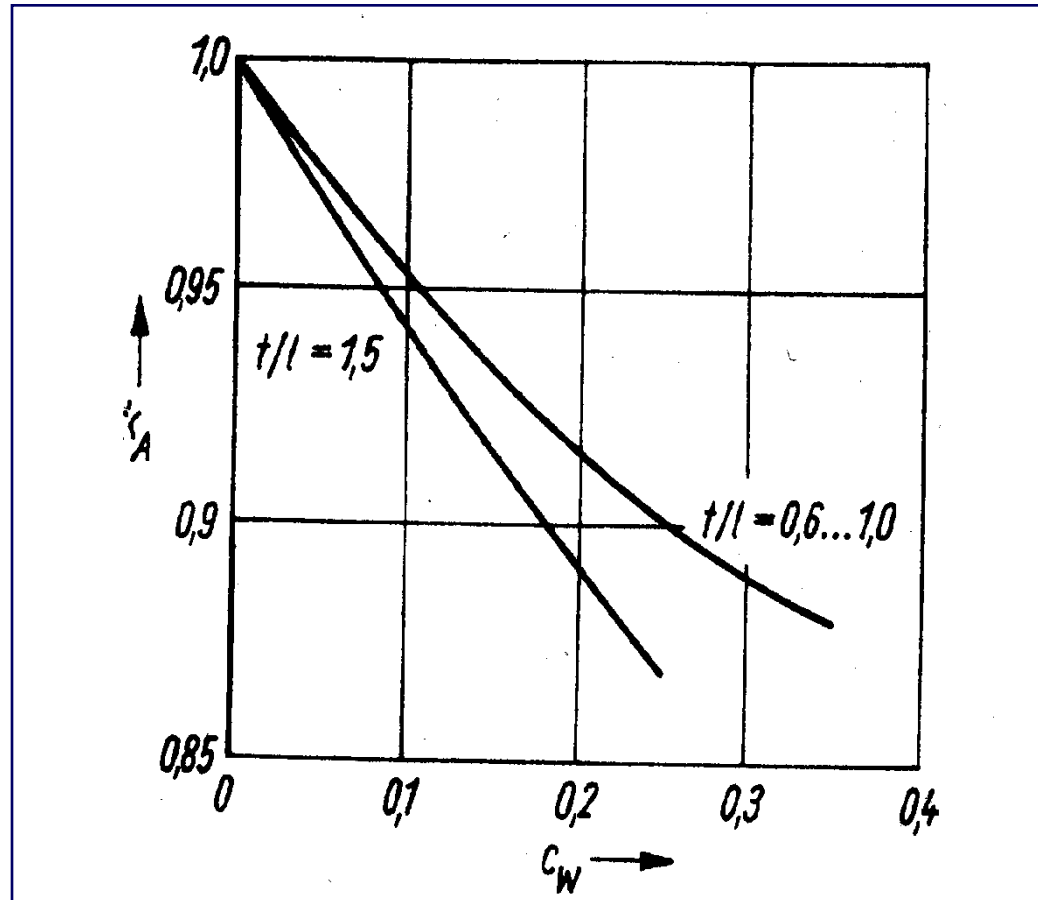
- ▶ Winkelabweichungen

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

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

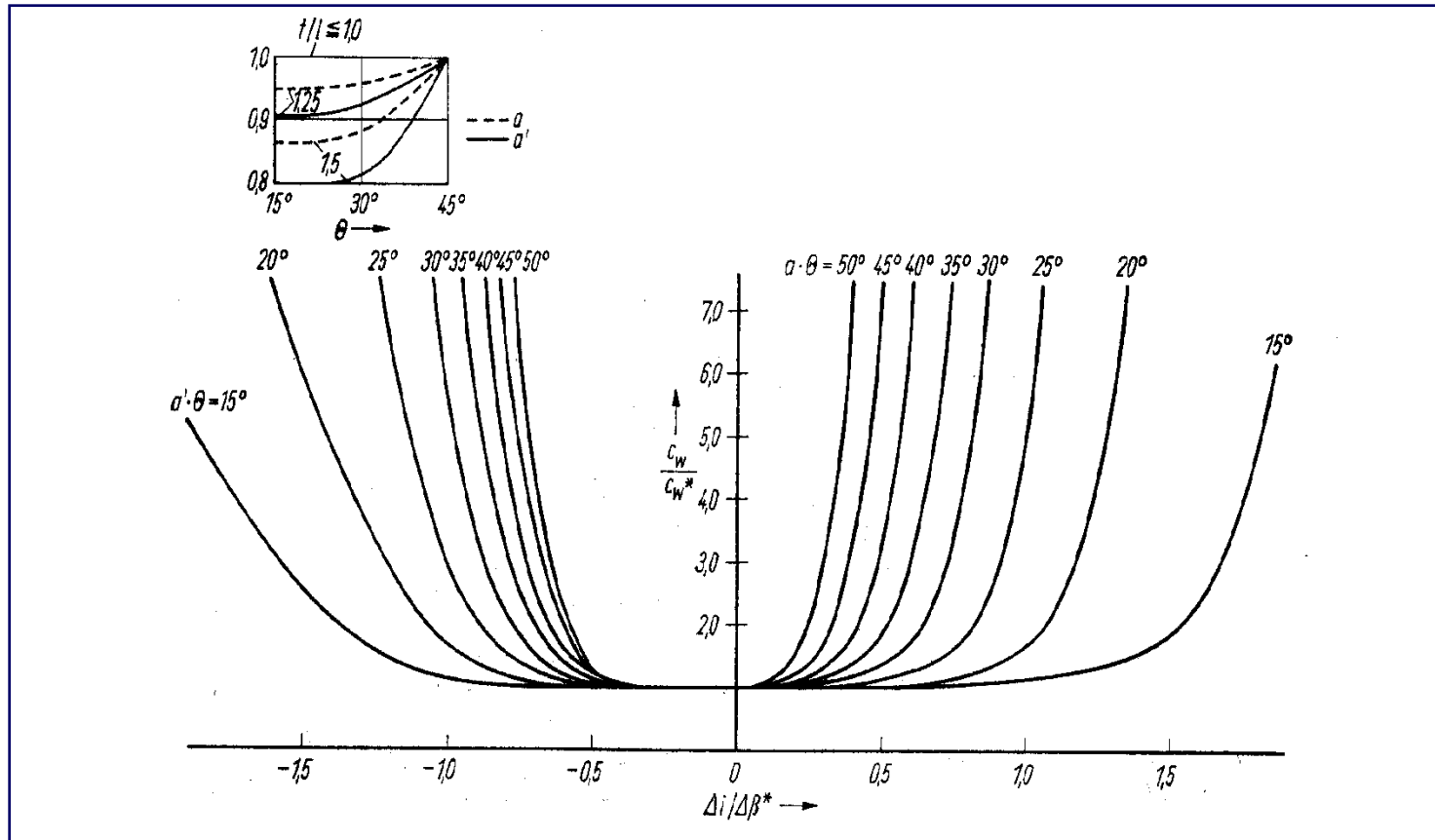
* - Werte: gelten für stoßfreie Zuströmung

D - Werte: berücksichtigen Stoßwinkel



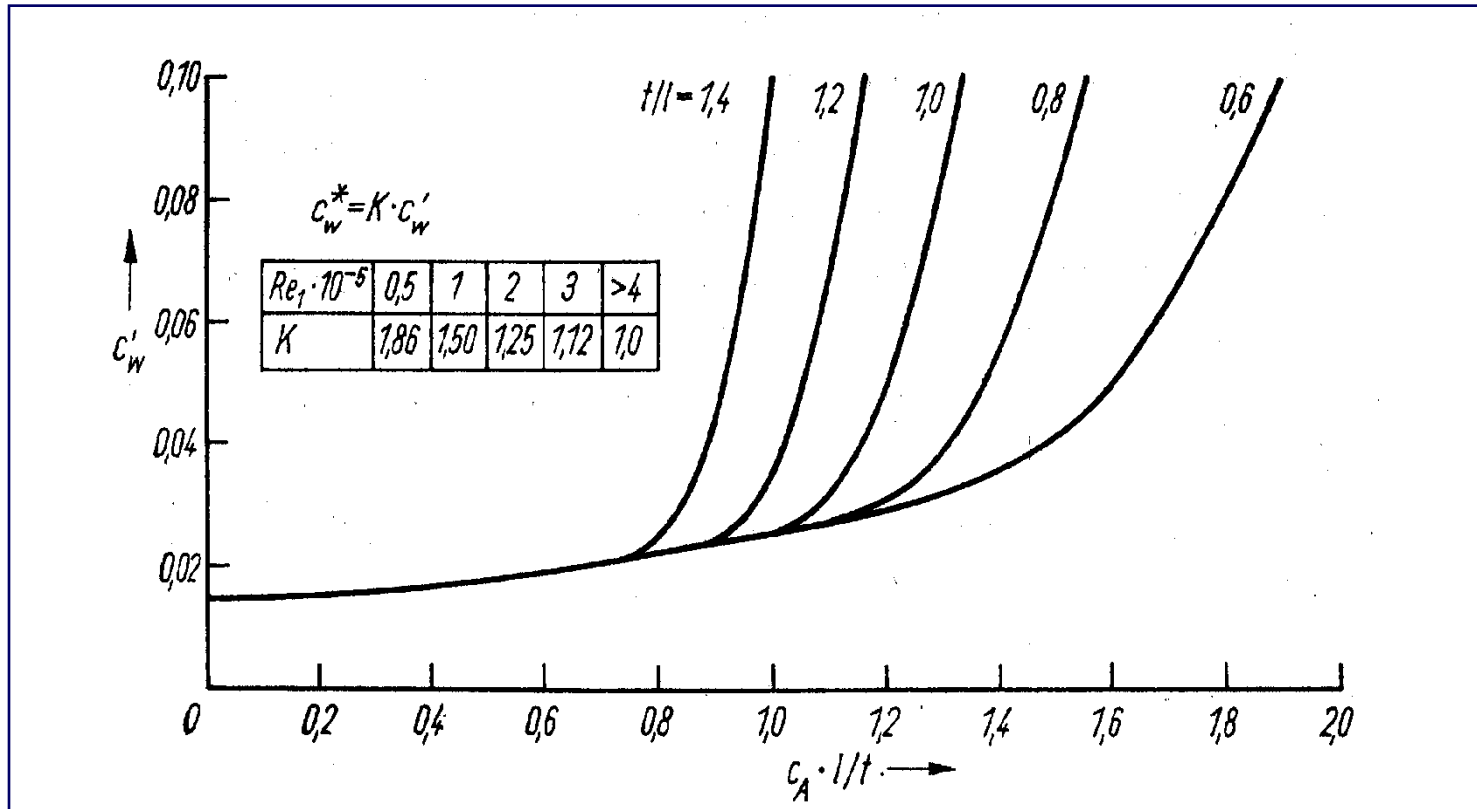
Verminderung des
Zirkulationsbeiwerts
durch Profilreibung

Quelle: W. Pohlenz "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"



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

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