

Sommersemester 2011

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

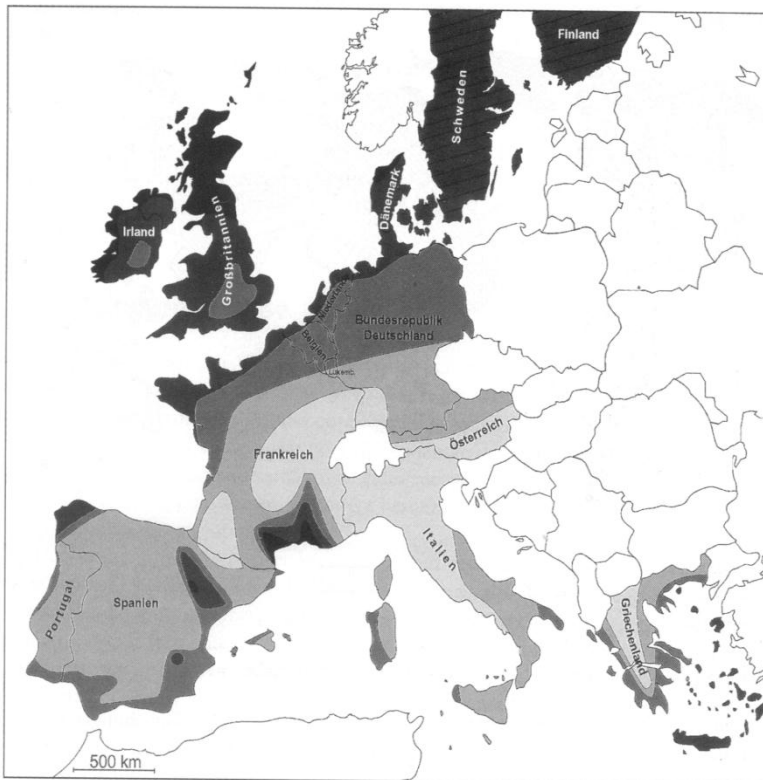
Kraft- und Arbeitsmaschinen,
Teil Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen



- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- Strömungsmaschinen in Anlagen
- Energieübertragung und Verluste
- Pumpen ; Kavitation
- Windkraftanlagen
- **Windkraftanlagen und Zusammenfassung**

Technische Nutzung ab etwa $v_w \geq 4,5$ m/s sinnvoll,
Anfahren bei ca. 3m/s)



Windressourcen in 50 m Höhe über Grund für fünf verschiedene topographische Bedingungen										
	Geschütztes Gelände		Offenes Land		Meeresküste		Offenes Meer		Hügel und Käme	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
Dark Gray	> 6,0	> 250	> 7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9,0	> 800	> 11,5	> 1800
Medium-Dark Gray	5,0-6,0	150-250	6,5-7,5	300-500	7,0-8,5	400-700	8,0-9,0	600-800	10,0-11,5	1200-1800
Medium-Light Gray	4,5-5,5	100-150	5,5-6,5	200-300	6,0-7,0	250-400	7,0-8,0	400-600	8,5-10,0	700-1200
Light Gray	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5,0-6,0	150-250	5,5-7,0	200-400	7,0-8,5	400-700
Very Light Gray	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5,0	< 150	< 5,5	< 200	< 7,0	< 400

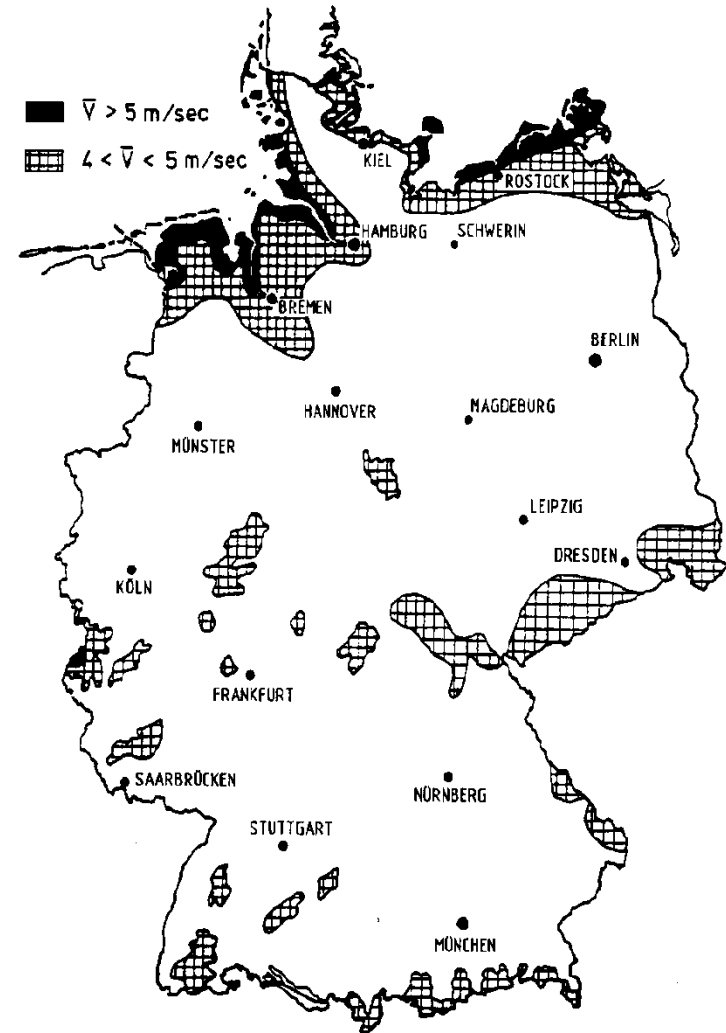
Europäischer Windatlas: Gebiete mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Windkarte von Deutschland

Gebiete in Deutschland, die für eine Aufstellung von Windkraftanlagen in Frage kommen (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 10 m Höhe)

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag



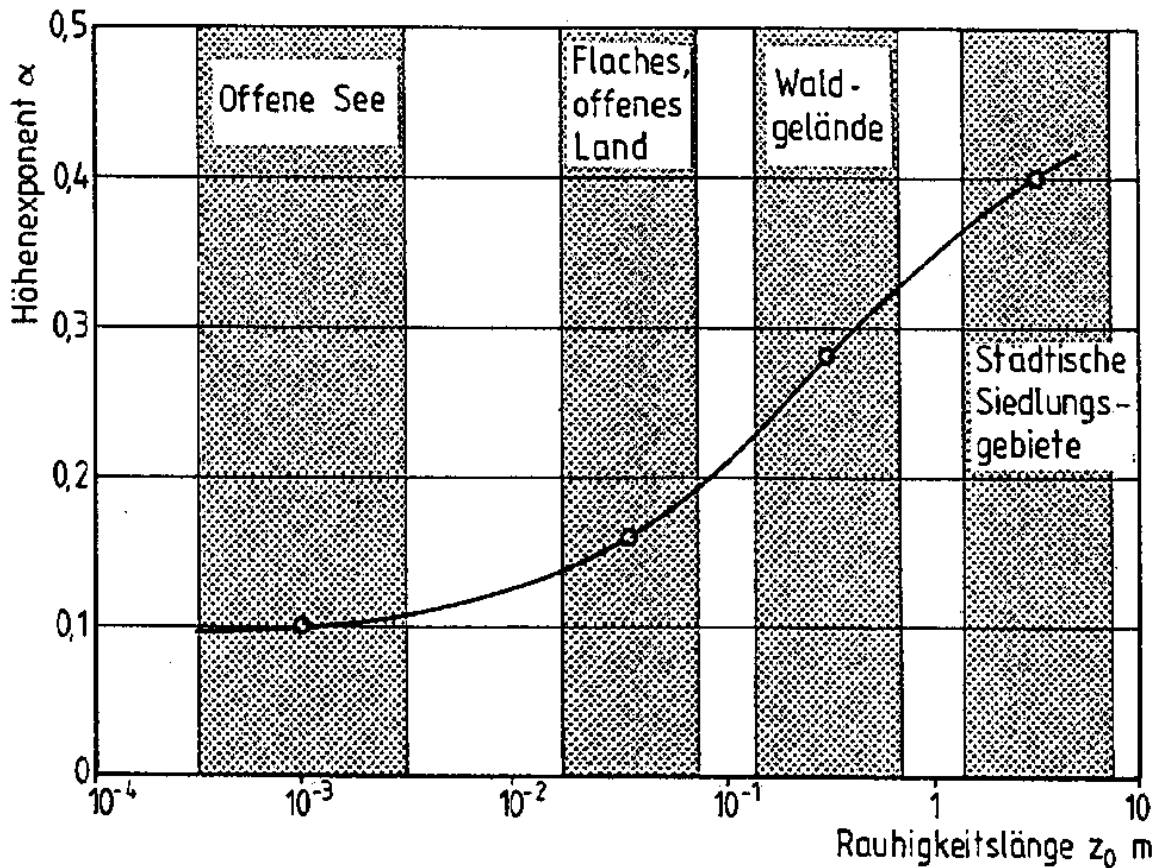


Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

Potenzansatz nach Hellmann

$$v_H = v^* \cdot \left(\frac{H}{H^*} \right)^a$$

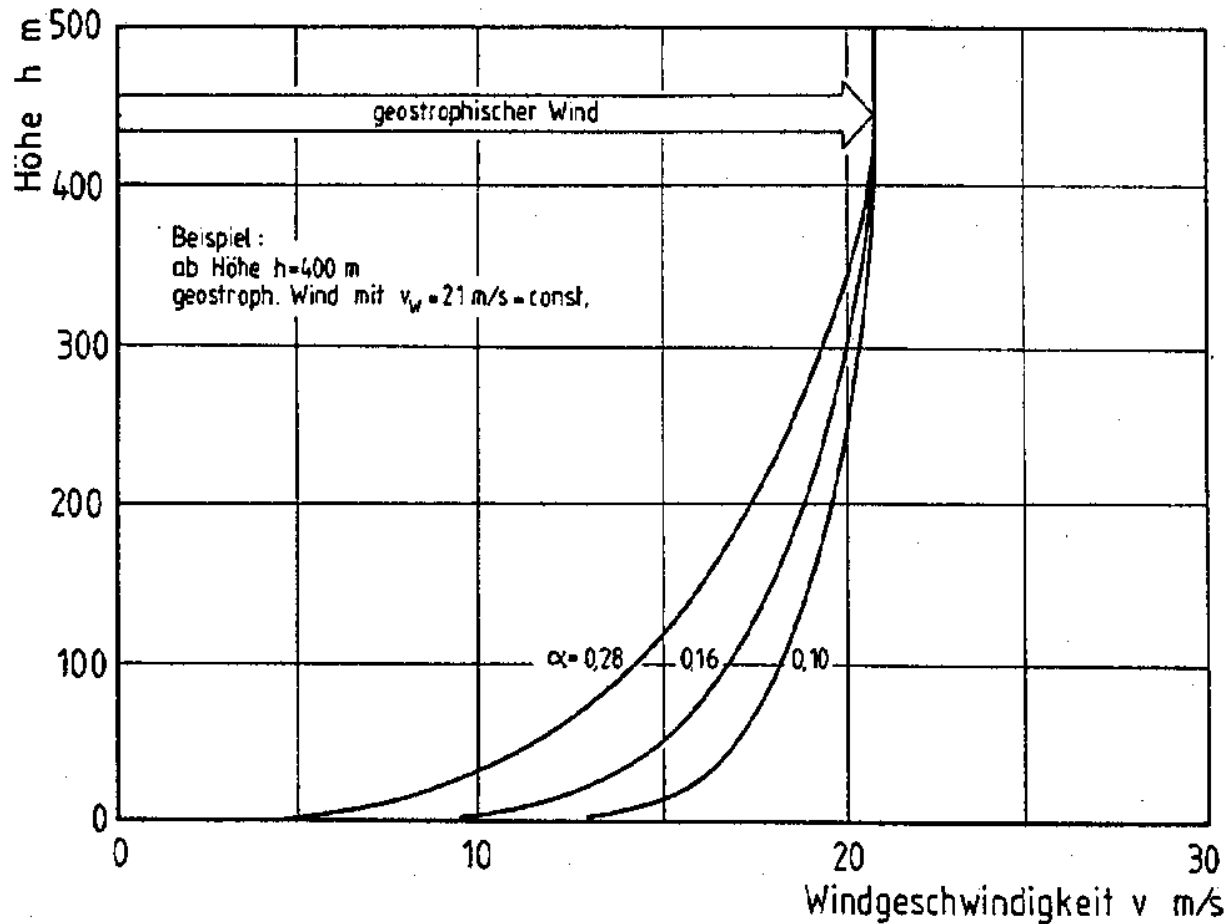
- v_H = mittlere Windgeschwindigkeit
- v^* = Bezugsgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe
- H^* = Referenzhöhe (i.d.R. 10 m)
- a = Höhenwindexponent



Hellmann-Exponent für unterschiedliche Geländeformen

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

höhenabhängiges Windangebot



Statisches Höhenprofil der Windgeschwindigkeit, gerechnet mit unterschiedlichen Hellmann-Exponenten

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Beispiel $c=10$ m/s; $\alpha=0,1$

Höhe [m]	50	100	200
Windgeschwindigkeit [m/s]	11,7	12,5	13,5

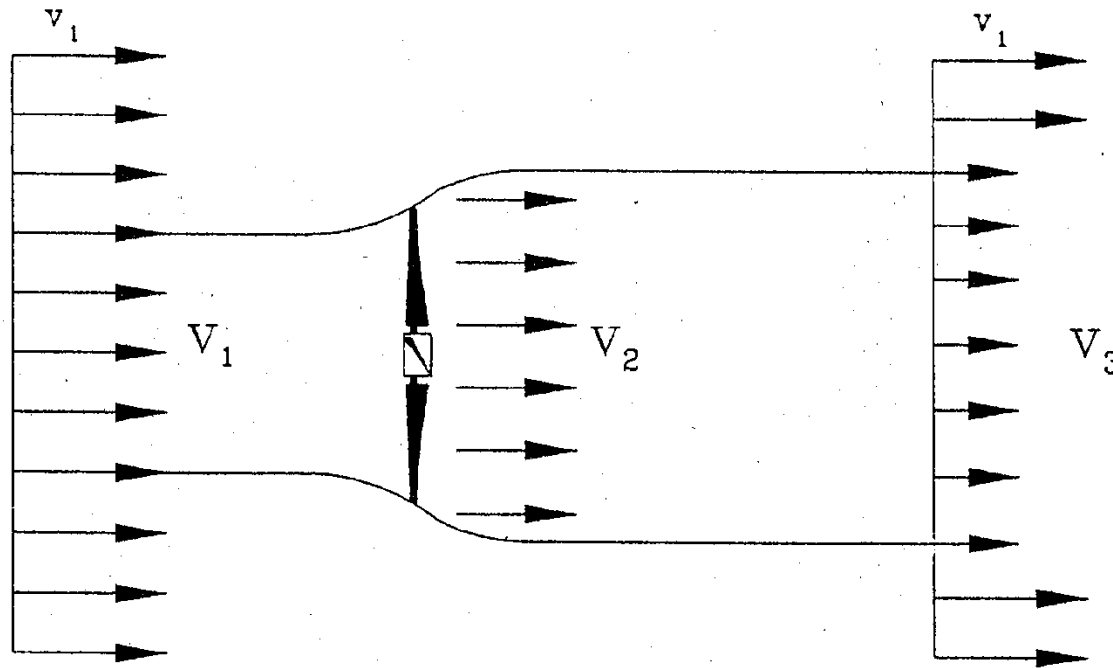
Tendenz zu hohen Türmen (z.B. 100 m)

- höhere Windgeschwindigkeit
- geringerer Einfluss der Grenzschicht-Wechselasten
- Probleme: Transport, Montage
- Beispiel: Aeolus II (3 MW, 80 m Turmhöhe)

Energie des Windes $E = \frac{1}{2} mc_1^2$ (1)

Leistung $P = \frac{1}{2} \dot{m}c_1^2$ $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c_1$ $A = \text{Querschnittsfläche}$ (2)

es gilt auch: $P = \frac{F(t) \cdot ds(t)}{dt} = F \cdot c$ und $P = \frac{\rho}{2} \cdot c_1^3 \cdot A$ (3)



Strömung durch ein stark idealisiertes Windrad nach Betz

Quelle: Windkraftanlagen, R. Gasch, B.G. Teubner Stuttgart



Annahme Betz:

- Verlustlose Leistungsentnahme
- Homogene Anströmung mit c_1
- Verzögerung in der „Druckscheibe“ auf c_3

$$\rho \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho \cdot c_2 \cdot A_2 = \rho \cdot c_3 \cdot A_3$$

dem Wind entzogene Leistung

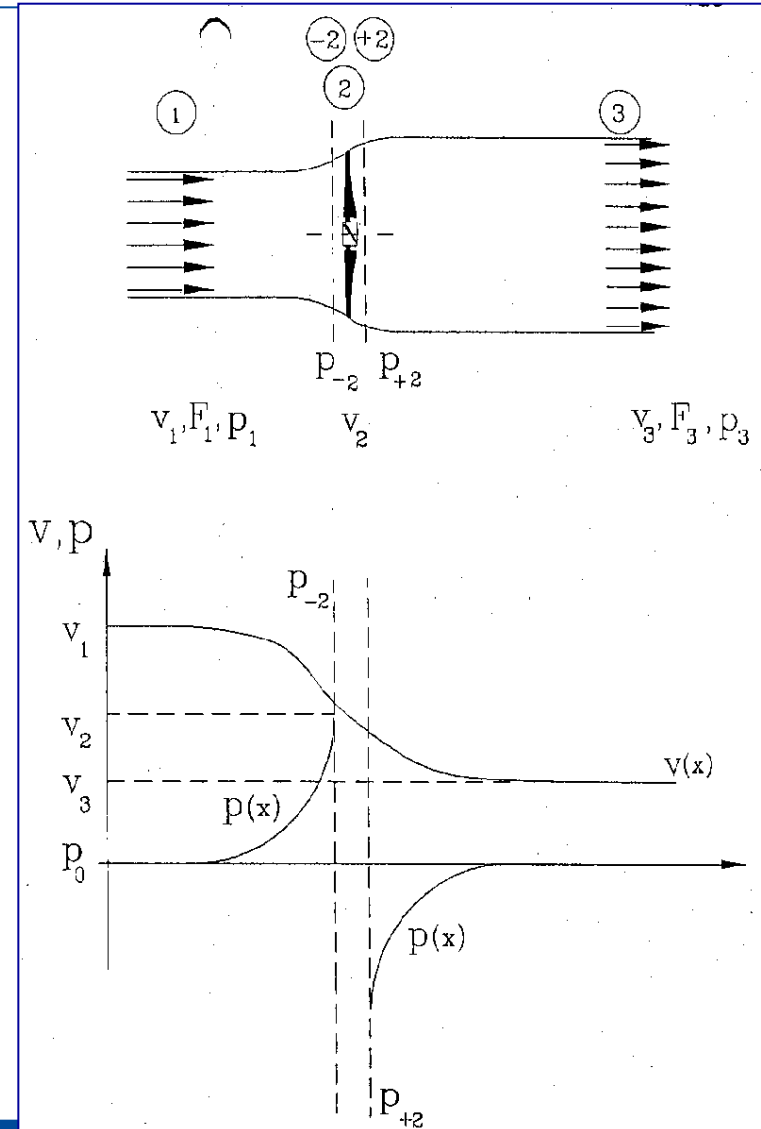
$$P_{entzogen} = \frac{1}{2} \dot{m} (c_1^2 - c_3^2) \quad (4)$$

$$c_1 = c_3 \quad \rightarrow \quad P_{entzogen} = 0$$

$$c_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = 0 \quad \rightarrow \quad P_{entzogen} = 0$$

Verlauf von Geschwindigkeit und statischem Druck p in der Stromröhre

Quelle: Gasch, R.: Windkraftanlagen



Schubkraft (aus Impulssatz)

$$F_{Schub} = \dot{m} (c_1 - c_3) \quad (5)$$

Prinzip actio = reactio

$$P = F \cdot c_2 = \dot{m}(c_1 - c_3) \cdot c_2 \quad (6)$$

Gleichsetzen der Gln. (4) und (6)

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{m}(c_1^2 - c_3^2) = \dot{m}(c_1 - c_3) \cdot c_2$$

Anwendung der 3. binom. Formel

$$c_2 = \frac{c_1 + c_3}{2} \quad (7)$$

Massestrom

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c_2 \quad (8)$$

Mit den Gln. (4), (7) und (8) wird

$$P_{\text{entzogen}} = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot (c_1^2 - c_3^2) \cdot (c_1 + c_3) \quad (9)$$

Das Verhältnis der entzogenen Leistung nach Gl. (9) und der im Wind enthaltenen Leistung Gl. (2) wird als Leistungsbeiwert c_P bezeichnet.

Leistungsbeiwert:
$$c_P = \frac{P_{\text{entzogen}}}{P}$$

nach einigen Umformungen ergibt sich

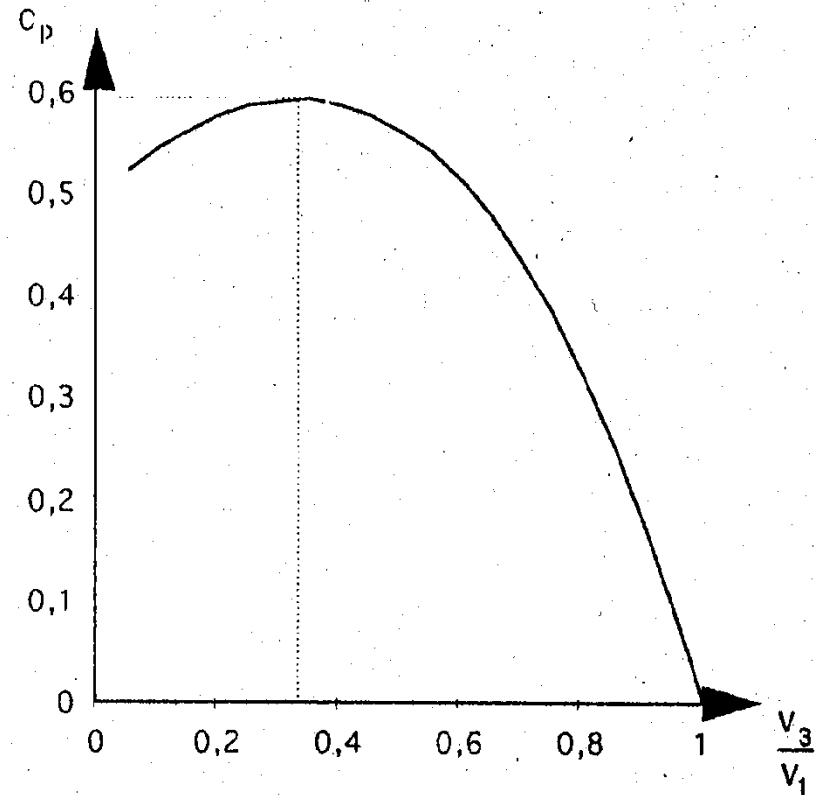
$$c_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{c_3}{c_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{c_3}{c_1} \right)$$

durch Nullsetzen der 1. Ableitung kann der maximale Leistungsbeiwert eines idealen Windrades berechnet werden.

es ergibt sich:

$$c_{p \max, \text{Betz}} = \frac{16}{27} = 0,59$$

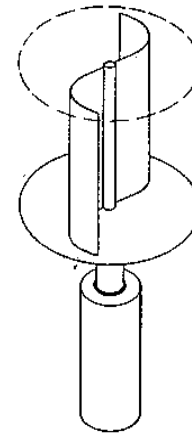
$$\text{bei } c_3 = \frac{1}{3} c_1$$



Leistungsbeiwert c_p in Abhängigkeit von dem Verhältnis Windgeschwindigkeit c_3 hinter dem Windrad zur Windgeschwindigkeit c_1 vor dem Windrad

Quelle: Gasch, R. : Windkraftanlagen

► Widerstandsläufer



► Auftriebsläufer (mit vertikaler oder horizontaler Achse)

Beispiel: Kreisplatte in Drehung

$$F_w = c_w \frac{\rho}{2} F v_w^2$$

$$c_w = 1,11$$

$$c = v_w - u \quad u = \omega \cdot r_M$$

$$F_w = c_w \frac{\rho}{2} F (v_w - u)^2$$

$$P = \frac{\rho}{2} c_w (v_w - u)^2 \cdot F_u$$

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\rho/2 c_w F (v_w - u)^2 u}{\rho/2 v_w^3 F}$$

$$c_{p,\max} \quad \text{bei ca.} \quad \frac{u}{v_w} = \frac{1}{3}$$

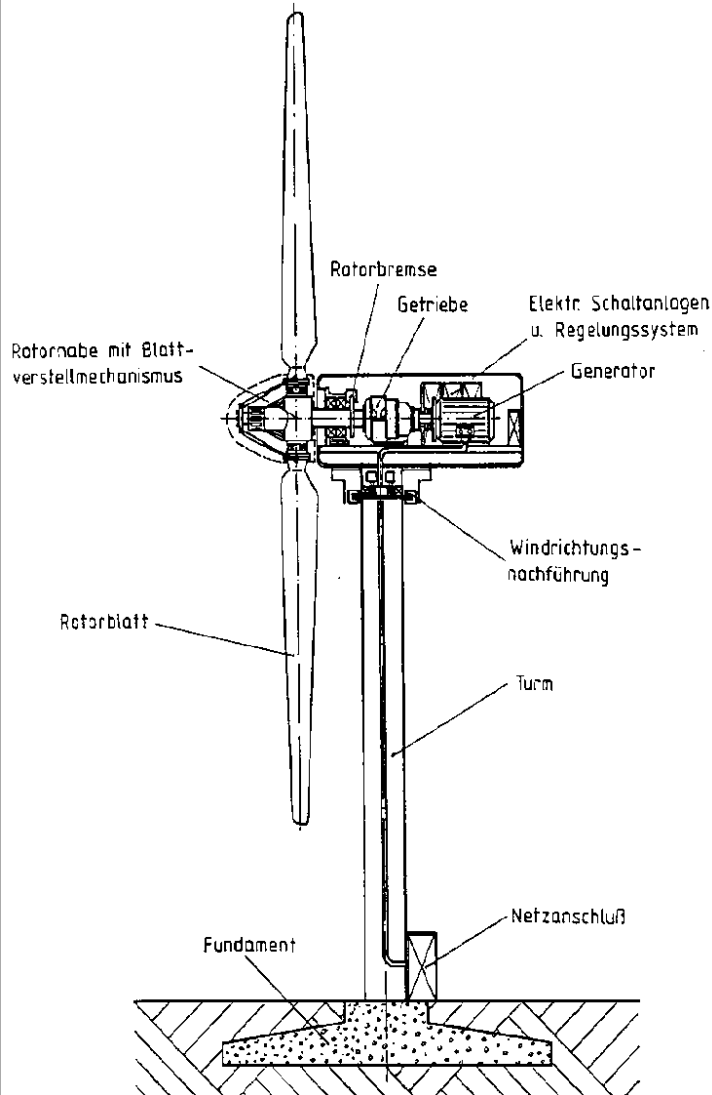
$$c_{p,\max} = \frac{4}{27} c_w = 0,148 \cdot c_w$$

$$c_{p,\max} \approx 0,17$$

Windkraftanlagen mit Nutzung der Auftriebswirkung

Horizontalachsen-Windkraftanlage Typ Bonus,
Rotordurchmesser 37 m,
Nennleistung 450 kW

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag





- Beschreibung der Geometrie
- Beschreibung der strömungstechnischen Eigenschaften



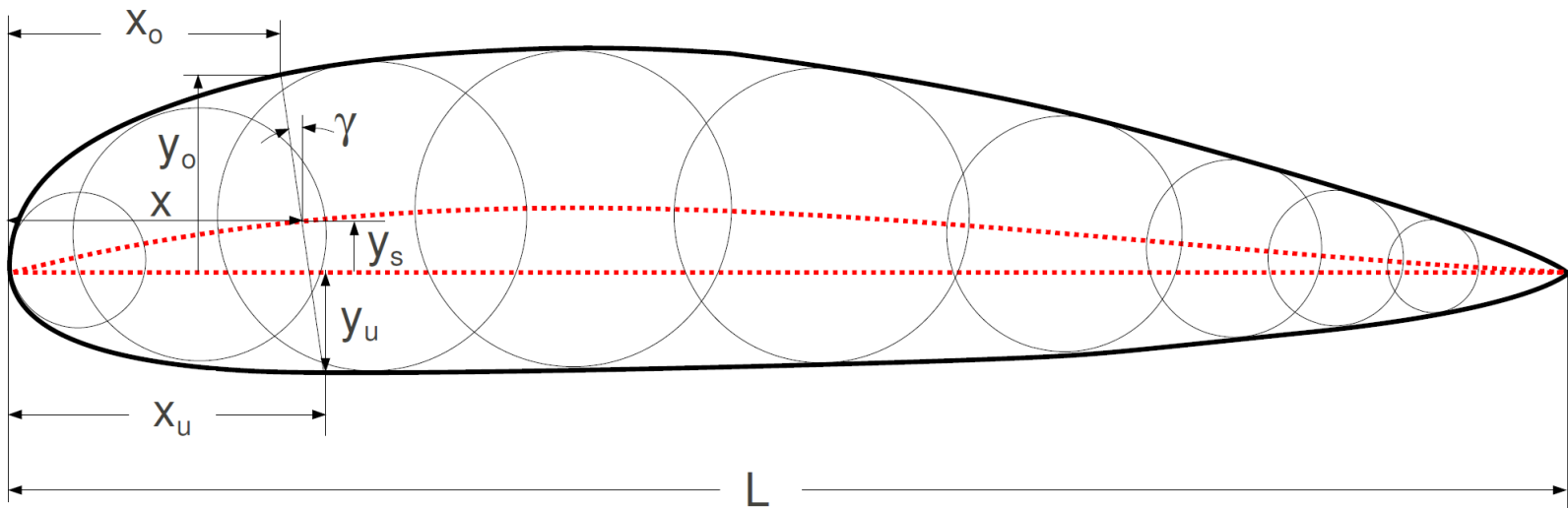
- Flügel von Vögeln
- Flugzeug
- Strömungsmaschinen
- Abtriebsflügel Formel1- Autos
- usw.



- 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): $x_u = x + y^{(t)} \sin \gamma$, $y_u = y^{(s)} - y^{(t)} \cos \gamma$

Geometrie	A_{fl} Fläche: $A_{fl} = L b$, $b = \text{konst.}$	
	b Breite (Spannweite)	
	β_s Staffelungswinkel	
	d maximale Dicke	
	f Wölbung	
	L Länge	
	r_k Kopfradius	
	x_d Dickenrücklage	
	x_f Wölbungsrücklage	
y_o Koordinaten: Oberseite		
y_u Koordinaten: Unterseite		
<p>Bezugslinie: Profilschne S NA = Nullauftriebsrichtung Winkel sind vorzeichenbehaftet</p>		

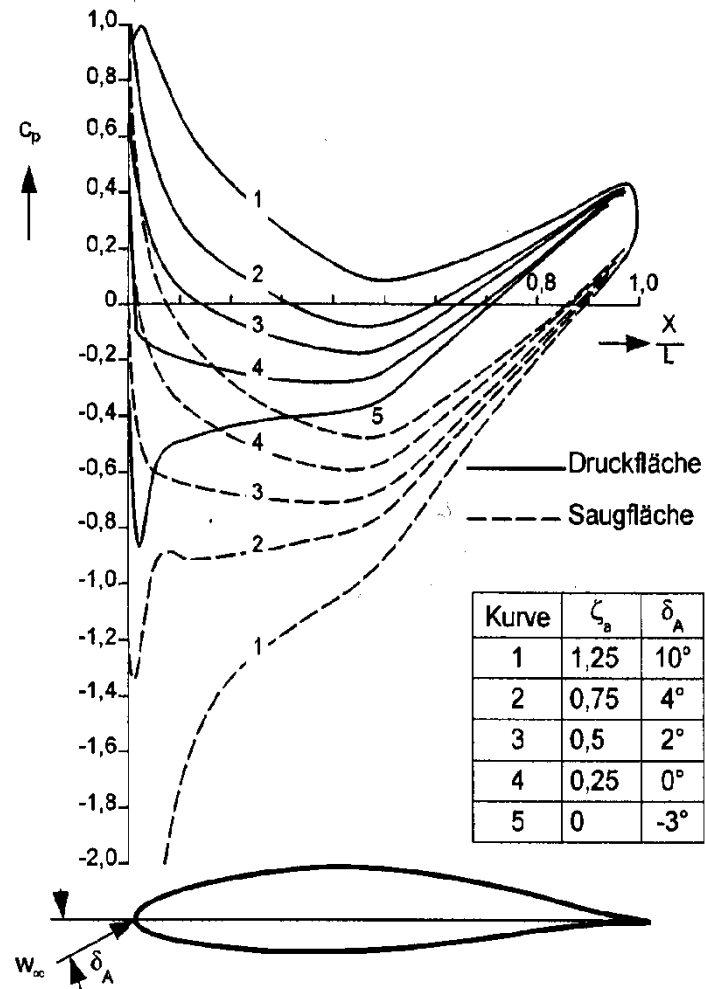
Quelle: J.F. Gülich "Kreiselpumpen"

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

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

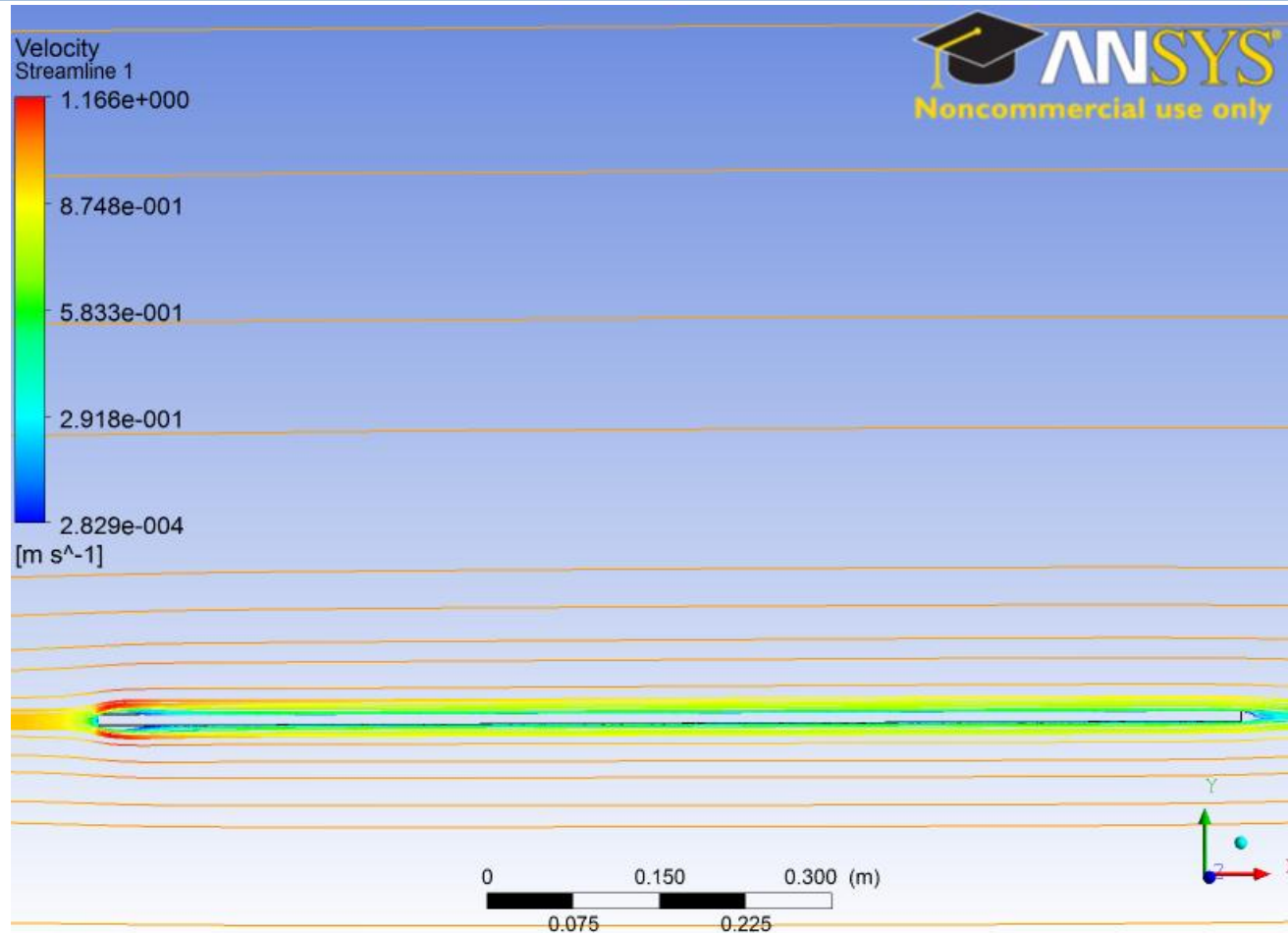
Druckverteilung um ein Tragflügelprofil, NACA 65₂-425

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



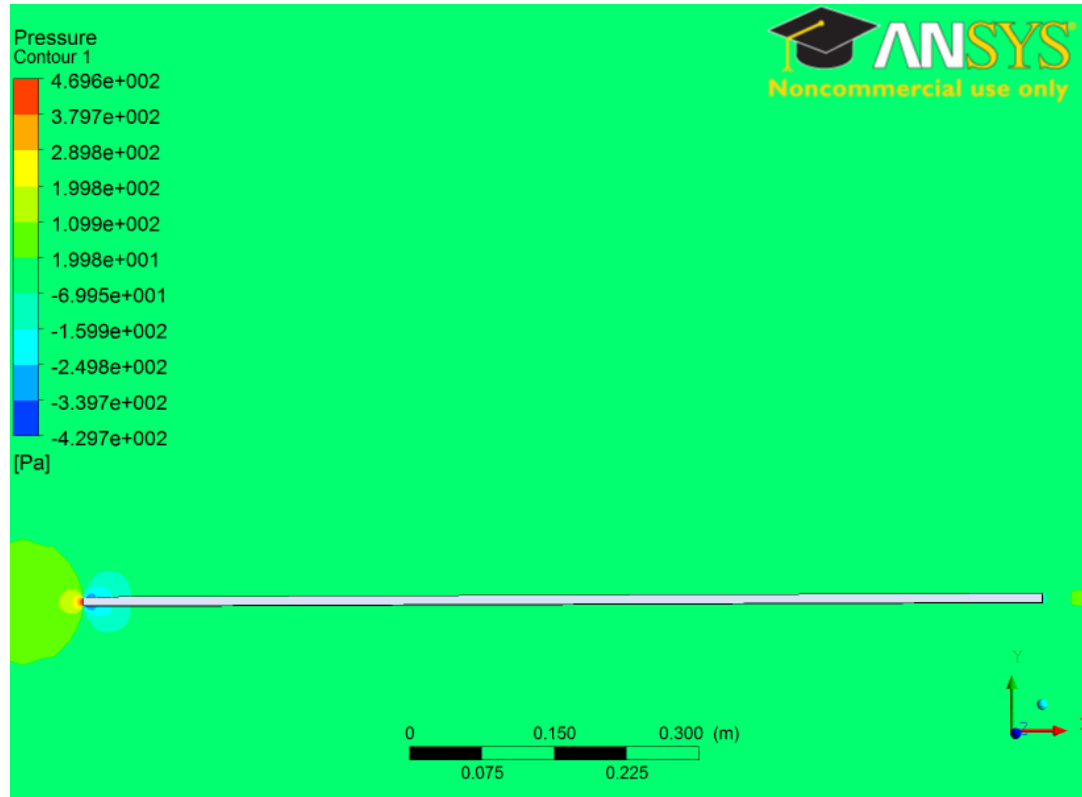
Quelle: J.F. Gülich "Kreiselpumpen"

Strömung um eine ebene Platte

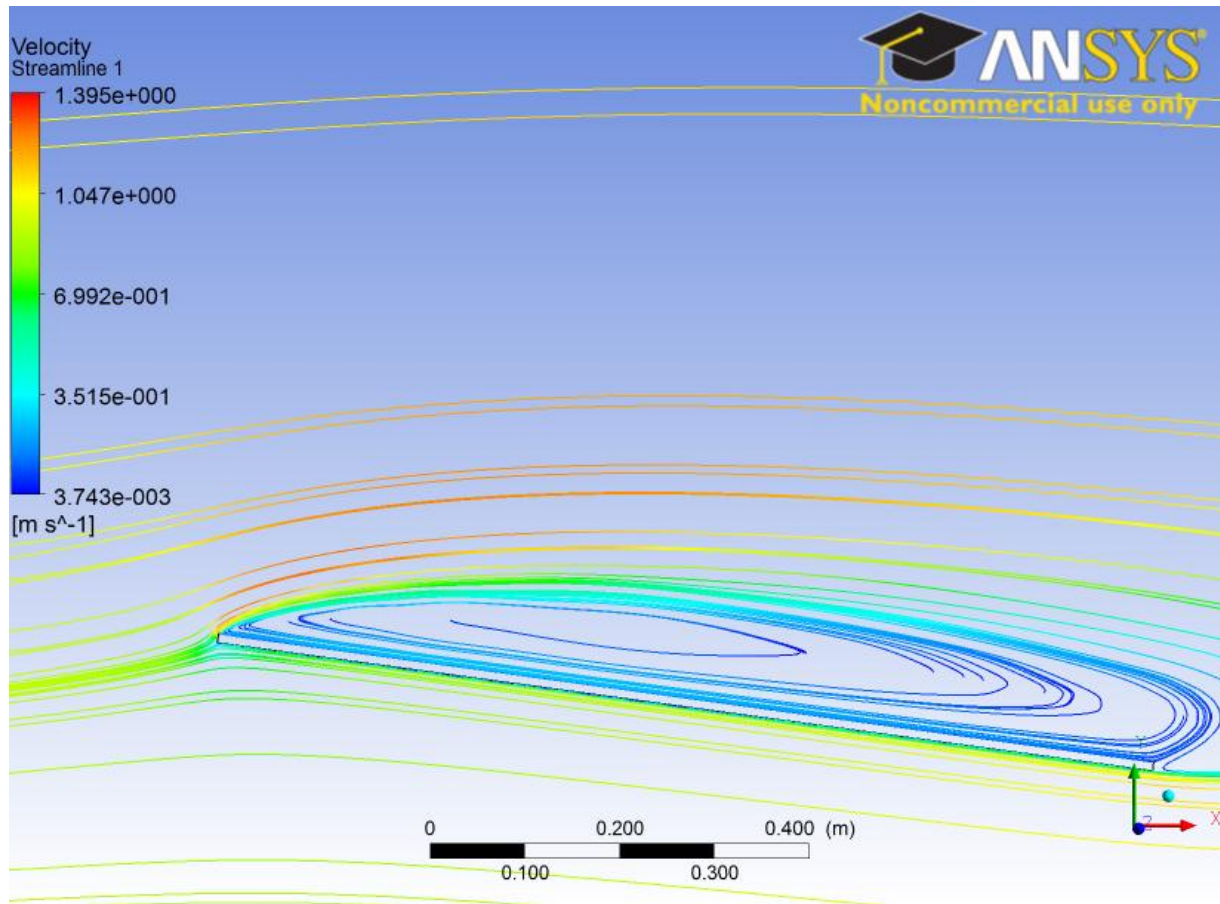


Stromlinien Anstellwinkel= 0 Grad

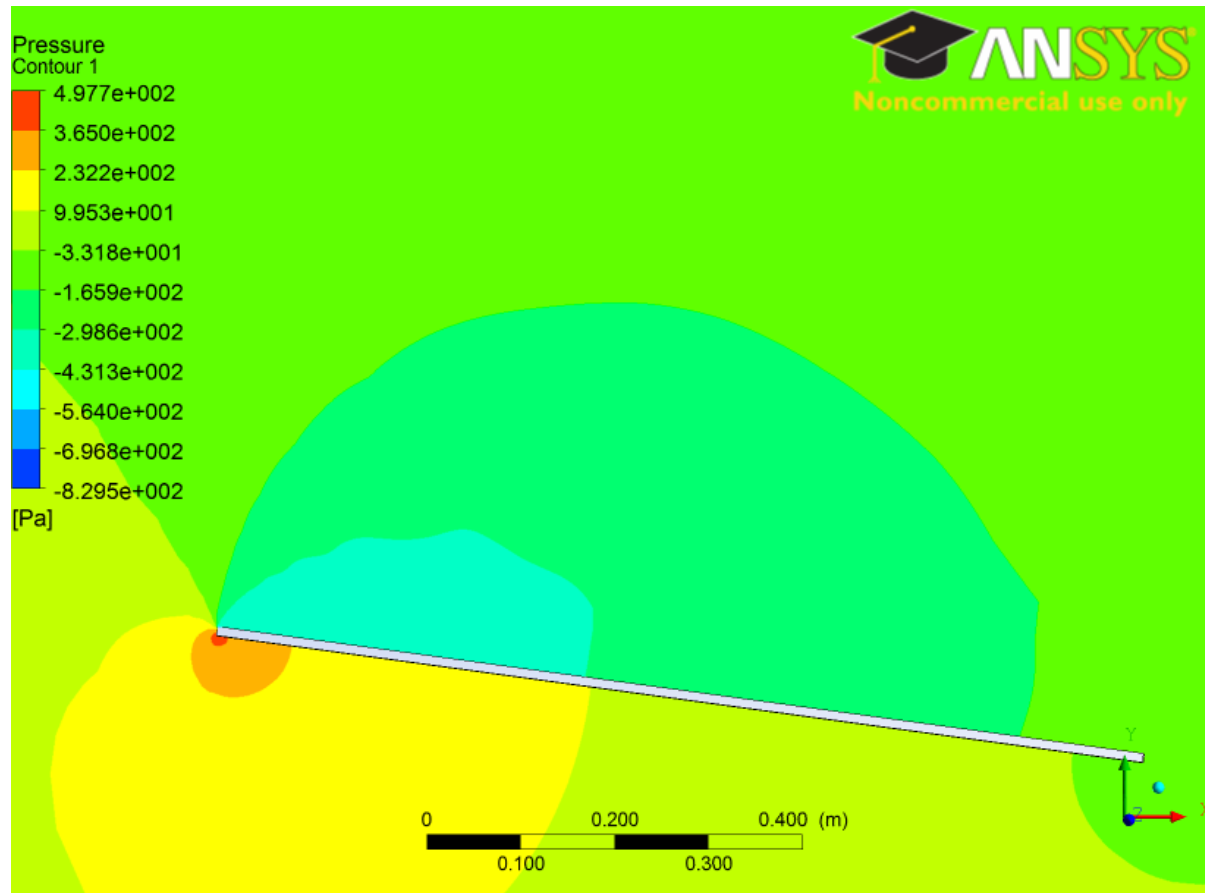
Strömung um eine ebene Platte



Statischer Druck Anstellwinkel= 0 Grad



Stromlinien Anstellwinkel= 8 Grad



Statische Druck Anstellwinkel= 8 Grad

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 und der Reynoldszahl



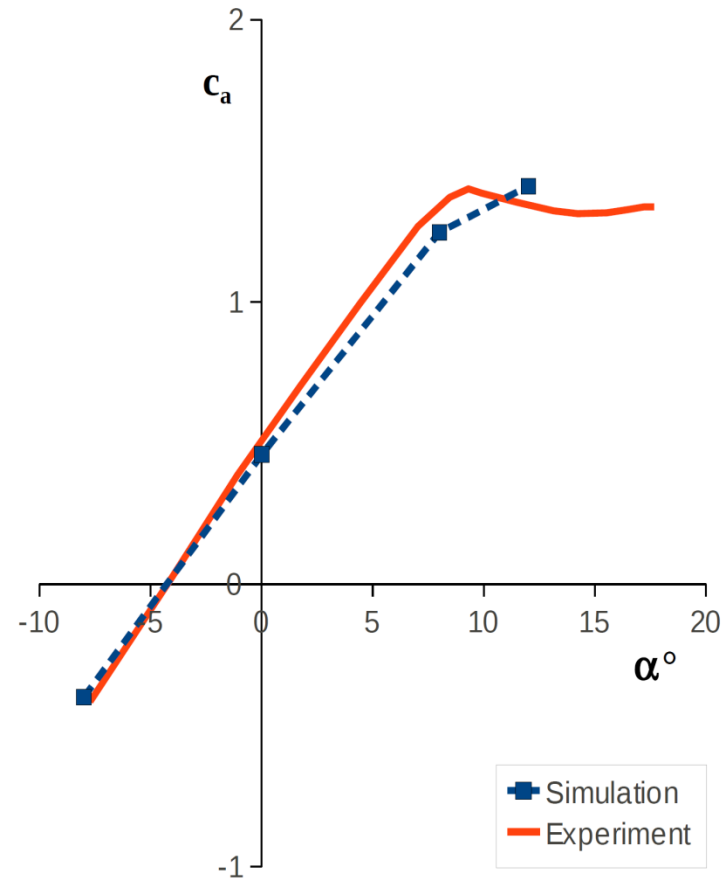
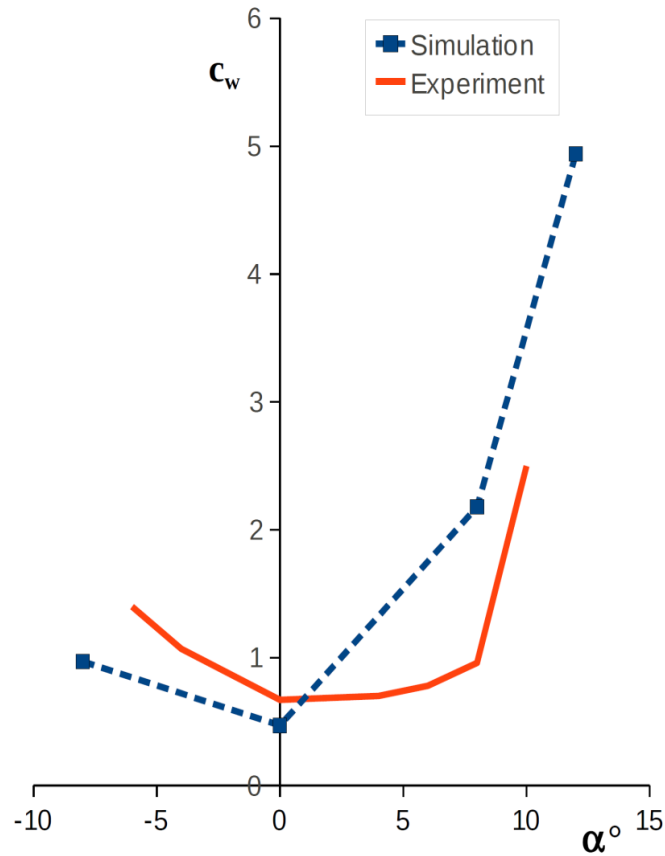
Moment

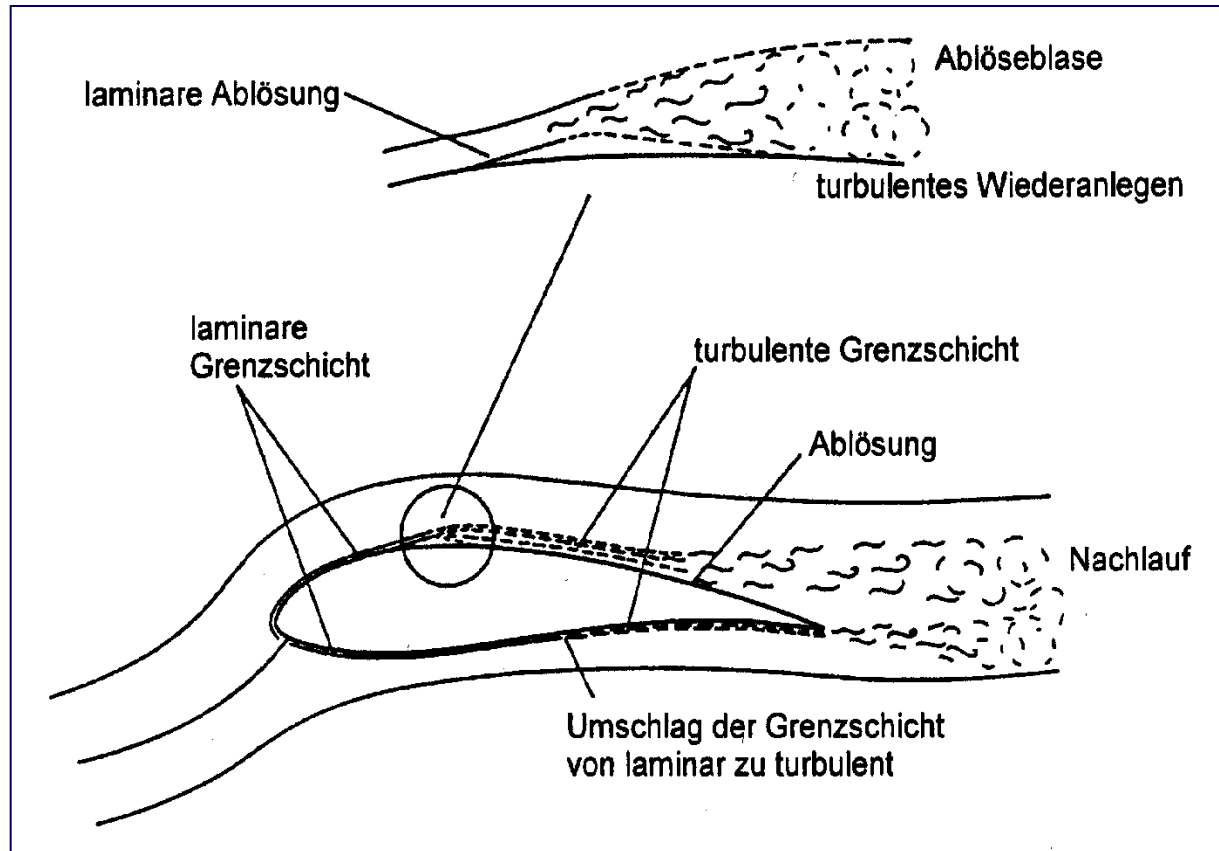
$$M = \frac{\rho}{2} \cdot c_{\infty}^2 \cdot c_m \cdot b \cdot l_P \cdot l_P$$

Abstand Profilspitze zum
Angriffspunkt der
Auftriebskraft

$$M \approx F_A \cdot s$$

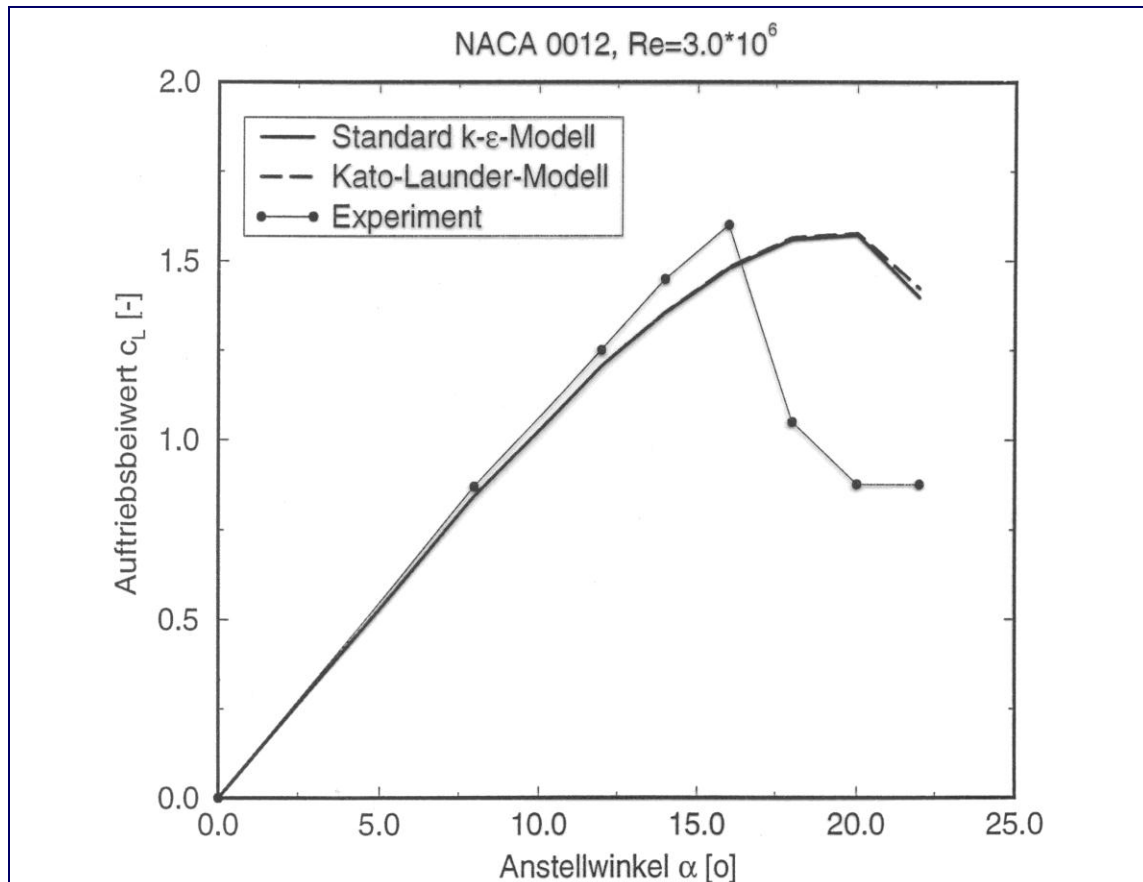
$$s \approx \frac{c_m}{c_a} \cdot l_P$$





Strömungen um
einen Tragflügel

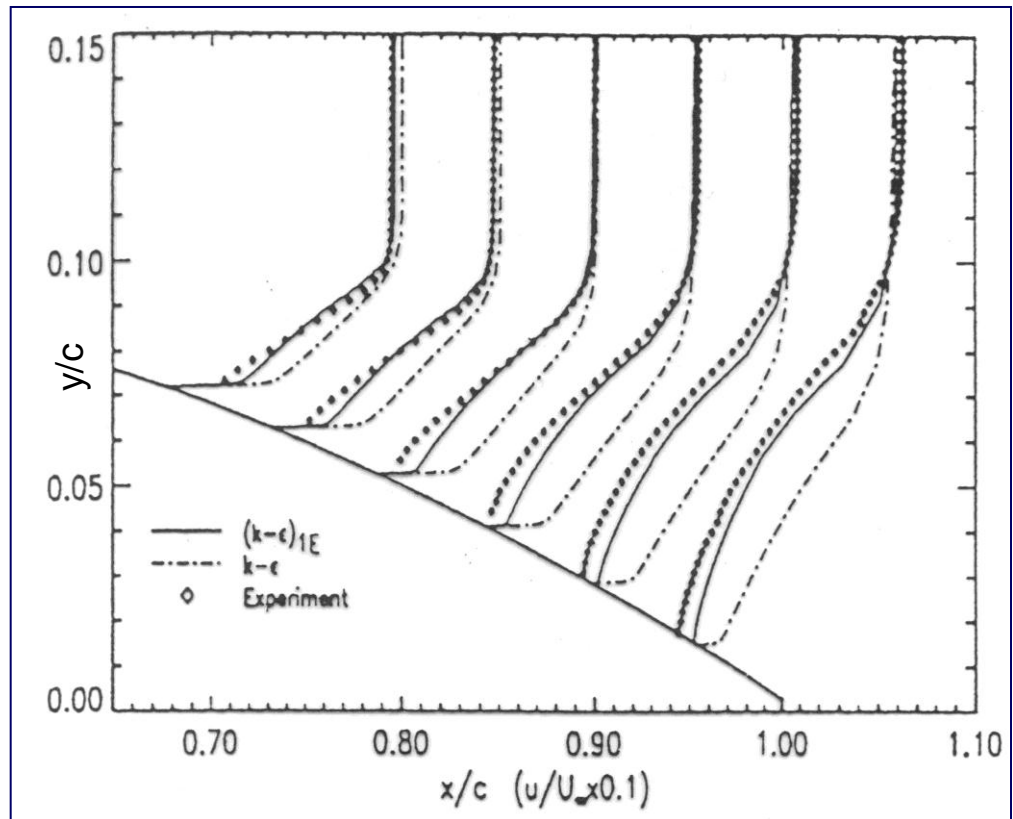
Auftriebsbeiwert über Anstellwinkel



Quelle: Esch, Th., ASC GmbH

Eddy Viscosity Transport Equations Part 1

Figure 20: Velocity profiles for NACA 4412 airfoil, $\alpha=13.87$, $Re=1.7 \times 10^6$.



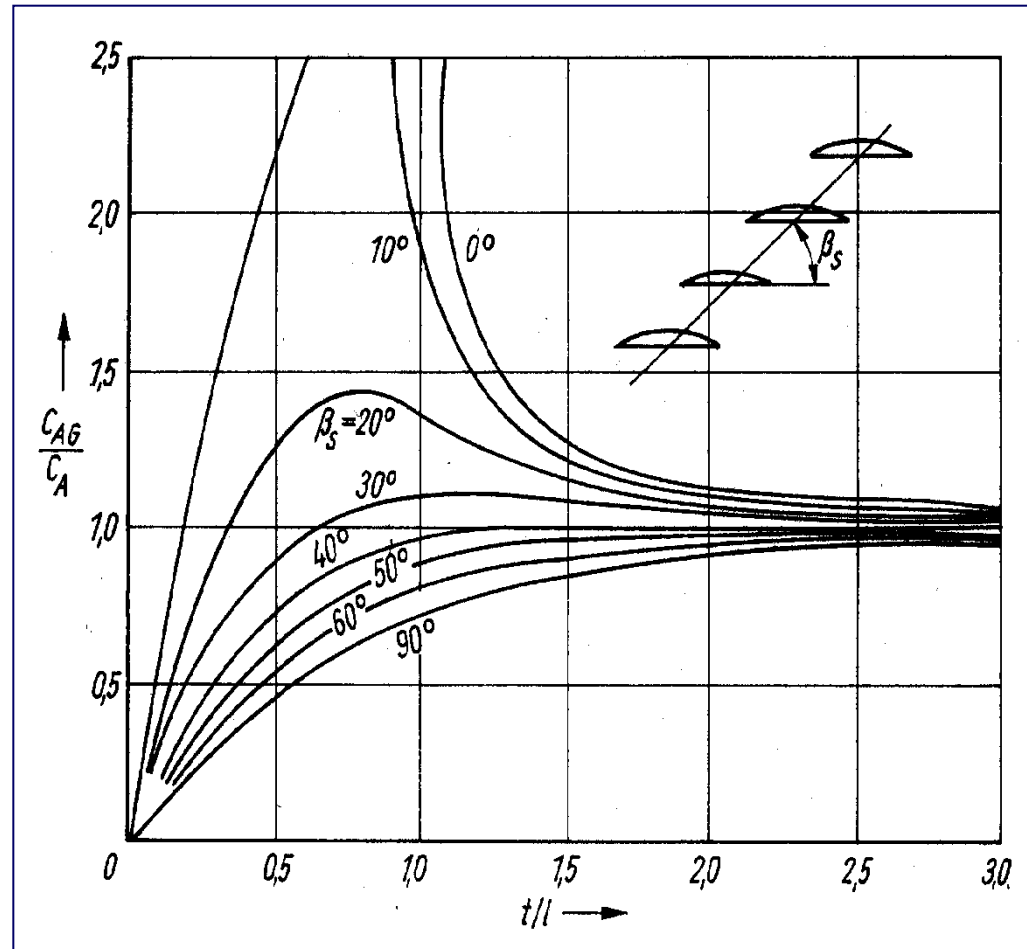
F.R. Menter:
Eddy Viscosity Transport Equations
and their relation to the $k-\epsilon$ model
NASA Technical Memorandum 108
854



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



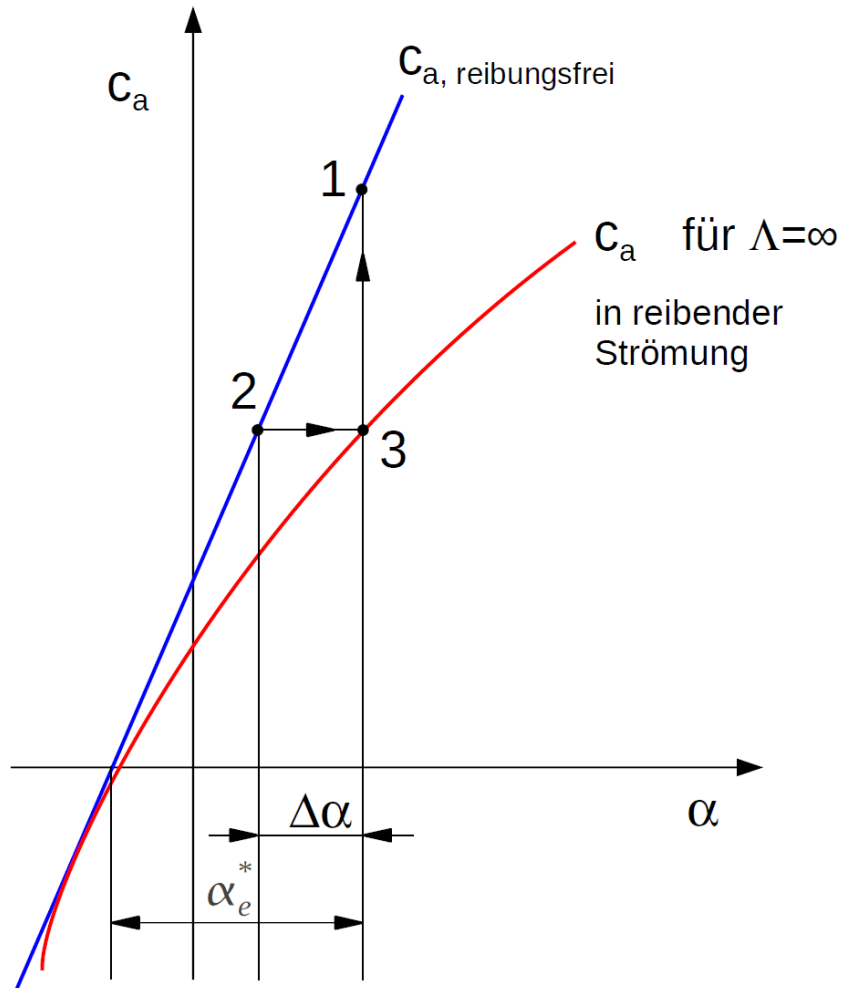
- Einfluss des Gitters muss untersucht werden
- Kenntnisse zum Einfluss der Rotation wären hilfreich



Quelle: W. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"



- Auftrieb und Widerstand sind abhängig von der Reynoldszahl und der Rauigkeit



*Auftriebsbeiwert in idealer
und reibungsbehafteter
Strömung*

(nach Albring Abb. 6.13)



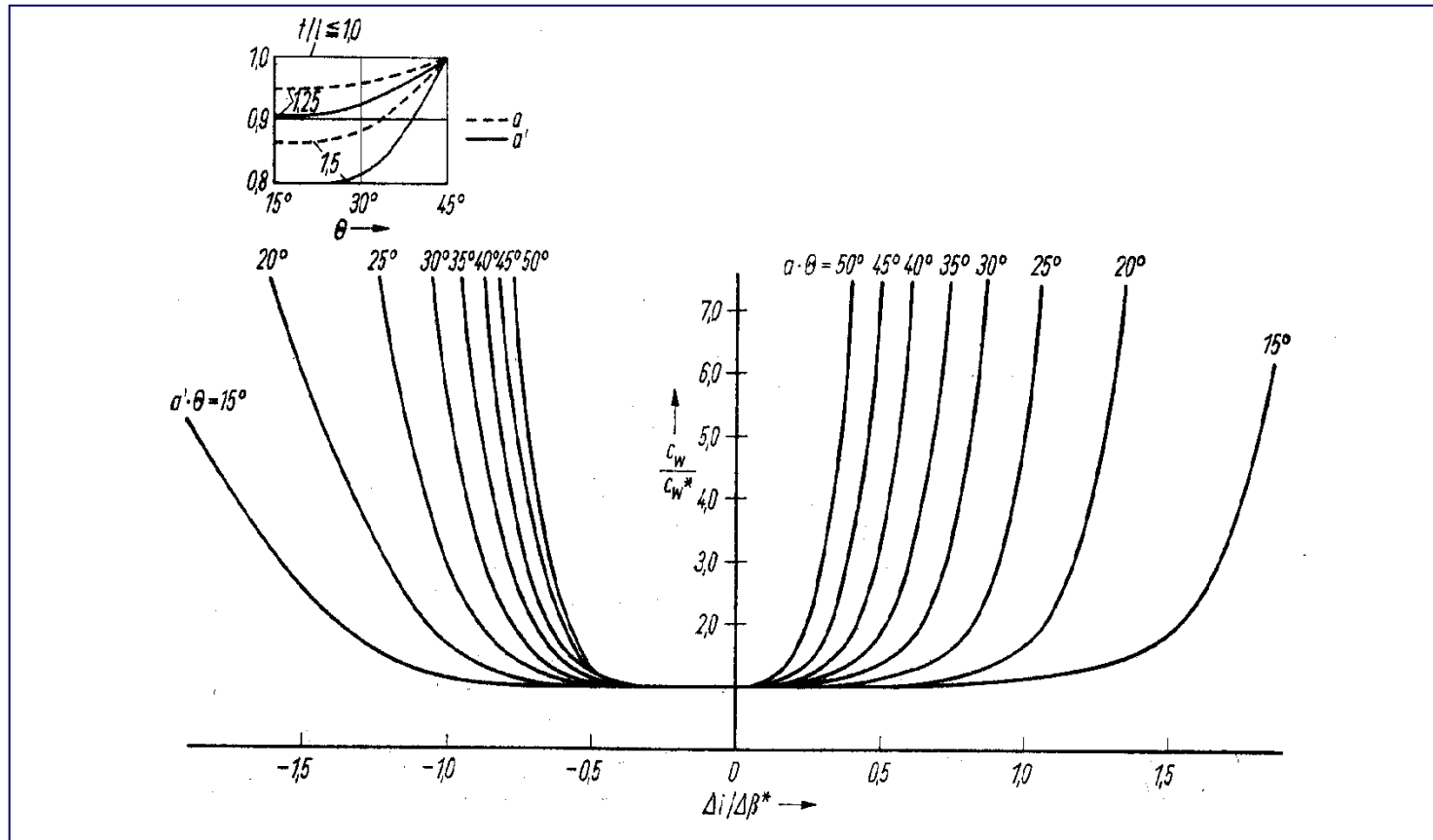
Strömungsgrößen	Auftriebsbeiwert	$\zeta_a = \frac{F_a}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A_{fl}}$	7.4.1
	Widerstandsbeiwert	$\zeta_w = \frac{F_w}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2 A_{fl}}$	7.4.2
	Gleitzahl	$\varepsilon = \frac{F_w}{F_a} = \tan \lambda$	7.4.3
	Druckbeiwert	$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} w_\infty^2}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

Quelle:
 J.F. Gülich
 "Kreispumpen"



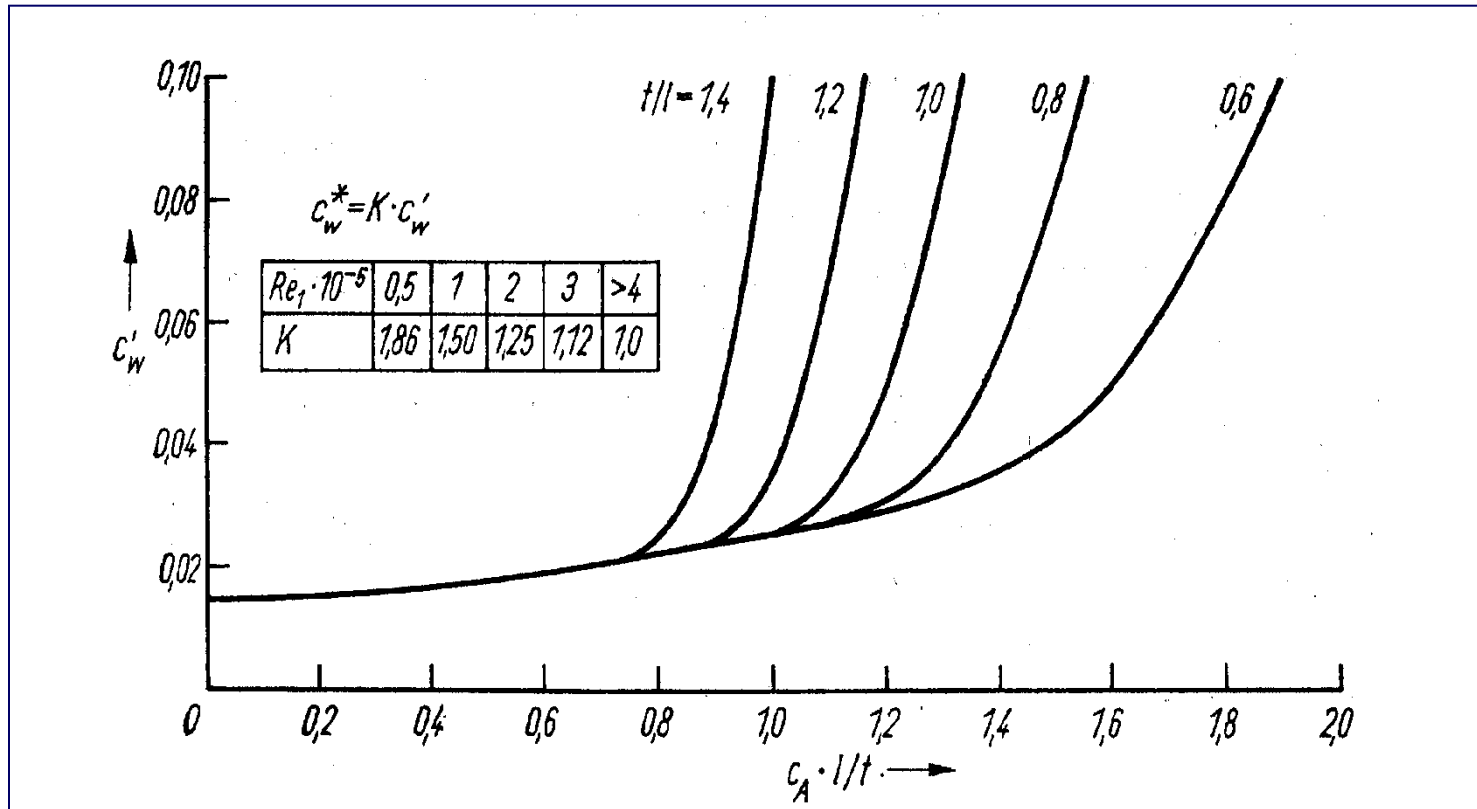
Nullauftriebsrichtung in Grad Bezugsrichtung: Profilschne Vorzeichen beachten !	$\delta_{NA} = -100 \frac{f}{L} \left\{ 0,82 + \frac{\left(\frac{x_f}{L}\right)^2}{1 + 5 \frac{d}{L}} \right\}$	7.4.5
Auftriebsbeiwert Profilwirkungsgrad: $\eta_P = 0,85$ bis $0,92$	$\zeta_a = 2\pi \eta_P \sin(\delta_A - \delta_{NA})$ $\zeta_a = \frac{d\zeta_a}{d\delta_A} (\delta_A - \delta_{NA})$	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"



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. Pohlenz "Bauteile für Pumpen"



- Prüfungstermin: 20.7.2011 14:00 Uhr
- Prüfungsdauer: 120 Min.
- Raum: III/111 und III/110A
- zugelassene Unterlagen:
 - Fragenteil: keine
 - Aufgabenteil: 1 DIN A4 Blatt handgeschriebene Formelsammlung
- Die Prüfung besteht aus einem Kolbenmaschinenteil und einem Strömungsmaschinenteil (je zu Hälfte).
- Zu jedem Bereich gibt es einen Fragenteil und einen Aufgabenteil.



Konsultationstermine:

- Montag, 18.07.2011 von 9:00 bis 10:00 Uhr im Raum III/112 mit Herrn Webersinke
- Dienstag, 19.07.2011 von 8:30 bis 9:30 Uhr im Raum III/111 mit Dr. Wiechmann