

# Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

## 12. Windturbinen Entwurf Lehrstuhl Strömungsmaschinen

# Gliederung der Vorlesung

1. Einführung, Einteilung, Historische Entwicklung, Aufbau und Wirkungsweise
2. Strömungsmechanische Grundlagen
3. Energieübertragung am Rotor, Ableitung der Euler'schen Turbomaschinengleichung
4. Ähnlichkeitsmechanik
5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte, Verluste
6. Kavitation
7. Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung
8. Pumpenbauarten, Sonderbauarten
9. Strömungswandler
10. Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbine, Wells-Turbine
11. Windturbinen – Einführung, Aufbau
12. **Windturbinen – Entwurf**
13. Dampfturbinen
14. Zusammenfassung

## 11.5 Tragflügel

# Tragflügel

## Grundlagen

- Berechnung der Kräfte am Tragflügel erfolgt auf Basis der verlustfreien Potenzialströmung (Potenzialtheorie)
- Trotzdem stimmt die Theorie gut mit praktischen Messungen überein

## Kräfte am Tragflügel

- Auftriebskraft  $F_A$  wirkt senkrecht zur Strömungsrichtung
- Widerstandskraft  $F_W$  wirkt in Strömungsrichtung
- Kräfte am Tragflügel

## Kräfte am Tragflügel

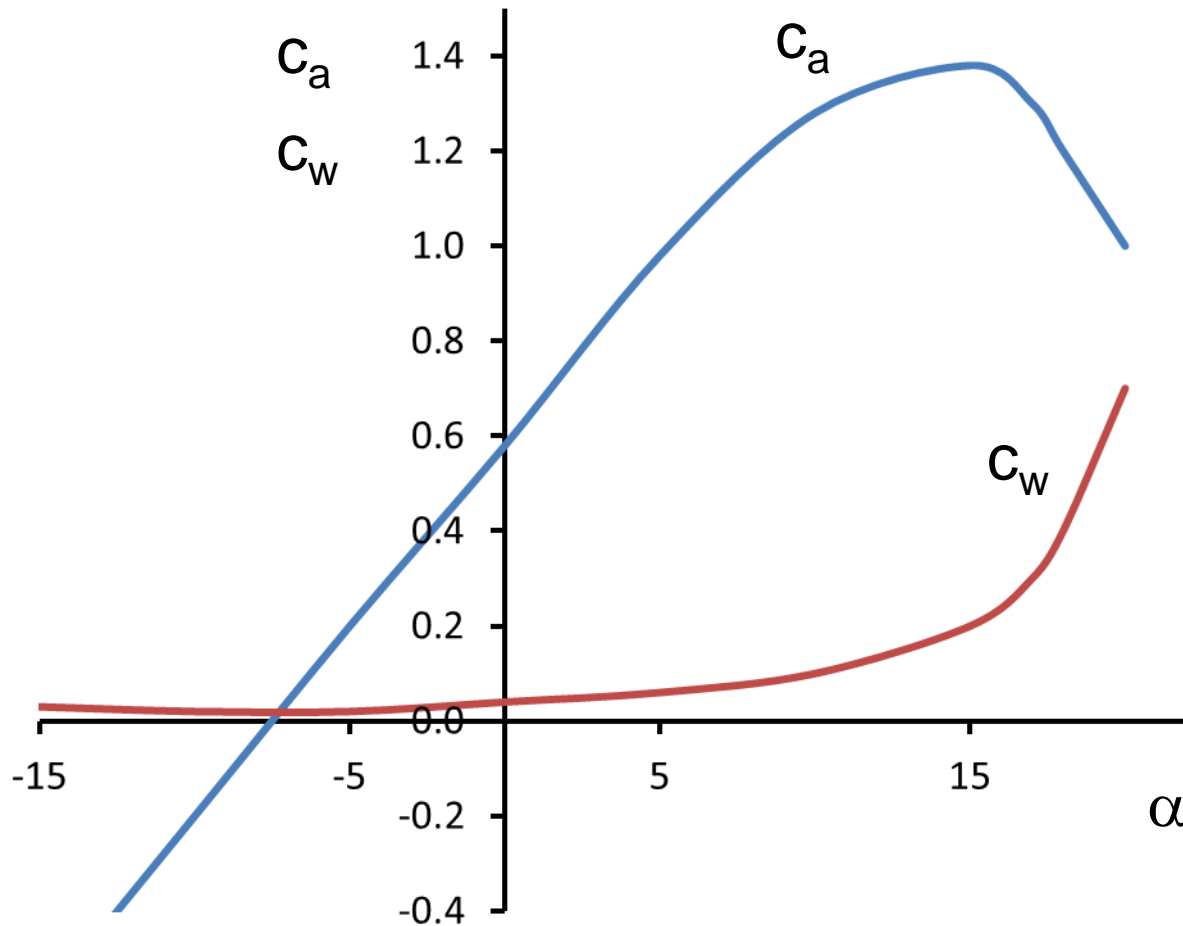
Auftriebskraft: 
$$F_A = c_a \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} c_\infty^2$$

Widerstandskraft: 
$$F_W = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} c_\infty^2$$

mit: 
$$A = b \cdot l_P$$

Die **Kennzahlen**  $c_a$  und  $c_w$  sind abhängig von:

- Körperform (Profil)
- Anstellwinkel  $\alpha$
- Reynolds-Zahl
- Wandrauheit



*Anstell- und Widerstandsbeiwerte über den Anstellwinkel gekrümmter Profile*

## 11.6 Zirkulation $\Gamma$ - Einführung

# Zirkulation $\Gamma$

Zirkulation: Gesamtaussage über die Drehung in einem großen Bereich

Für die geschlossene Kurve  $L$  wird das skalare Produkt aus  
Wegelement  $\cdot$  Geschwindigkeit

gebildet und über die geschlossene Kurve  $L$  bei festgehaltener Zeit in Richtung des Weges integriert:

$$\Gamma = \oint_L \vec{c} \, d\vec{l} = \oint_L c \cos \alpha \, dl$$

mit Stokes'schen Integralsatz folgt:

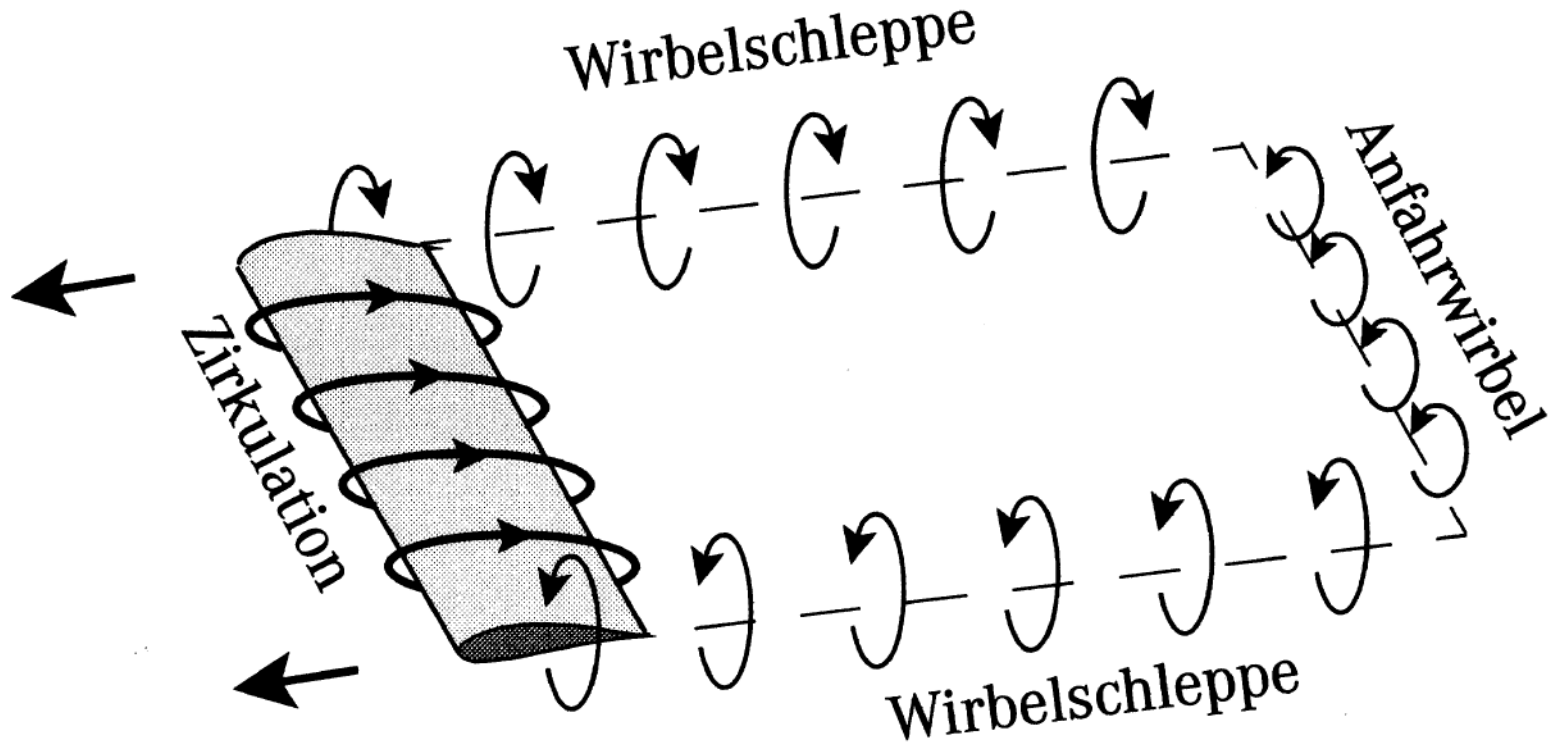
$$\Gamma = \oint_L \vec{c} \, d\vec{l} = 2 \int_A \omega \, dA$$

Satz von Kutta u. Joukowski für Einzelprofile:

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

Eine Zirkulation bewirkt eine Auftriebskraft!

## Randeinflüsse



Quelle: Junge, Gerd: Einführung in die Technische Strömungslehre

## 11.7 rotierender Tragflügel

## Geschwindigkeitsdreiecke und Kräfte am rotierenden Tragflügel

## rotierender Tragflügel

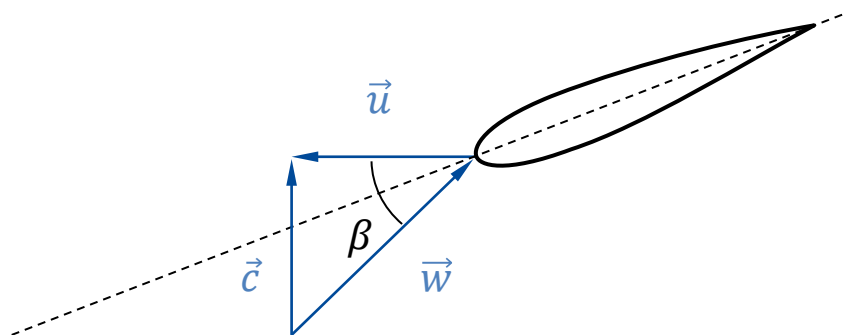
Die aus der Auftriebs- und Widerstandskraft resultierende Kraft wird aufgeteilt in eine:

- in Drehrichtung gerichtete Umfangskraft  $F_U$

$$\begin{aligned} F_U &= F_A \cdot \sin \beta - F_W \cdot \cos \beta \\ &= \frac{\rho}{2} w^2 A_{Fl} (c_a \sin \beta - c_W \cdot \cos \beta) \end{aligned}$$

- in Windrichtung gerichtete Schubkraft  $F_S$

$$\begin{aligned} F_S &= F_A \cdot \cos \beta + F_W \cdot \sin \beta \\ &= \frac{\rho}{2} w^2 A_{Fl} (c_a \cos \beta + c_W \cdot \sin \beta) \end{aligned}$$



# rotierender Tragflügel

## Schnellaufzahl $\lambda$

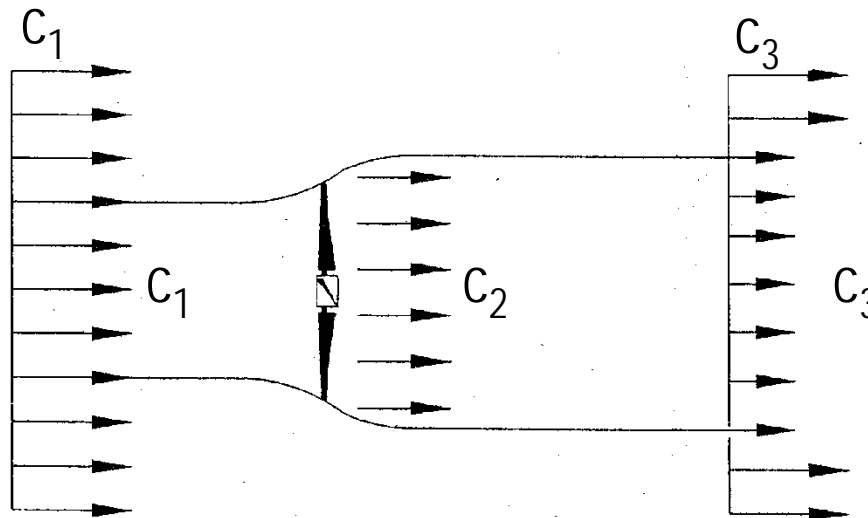
$$\lambda = \frac{u_{max}}{c_0} = \frac{R \cdot \omega}{c_0}$$

mit:  $R$  ... *Rotorblattlänge*  
 $c_0$  ... *ungestörte Windgeschwindigkeit*

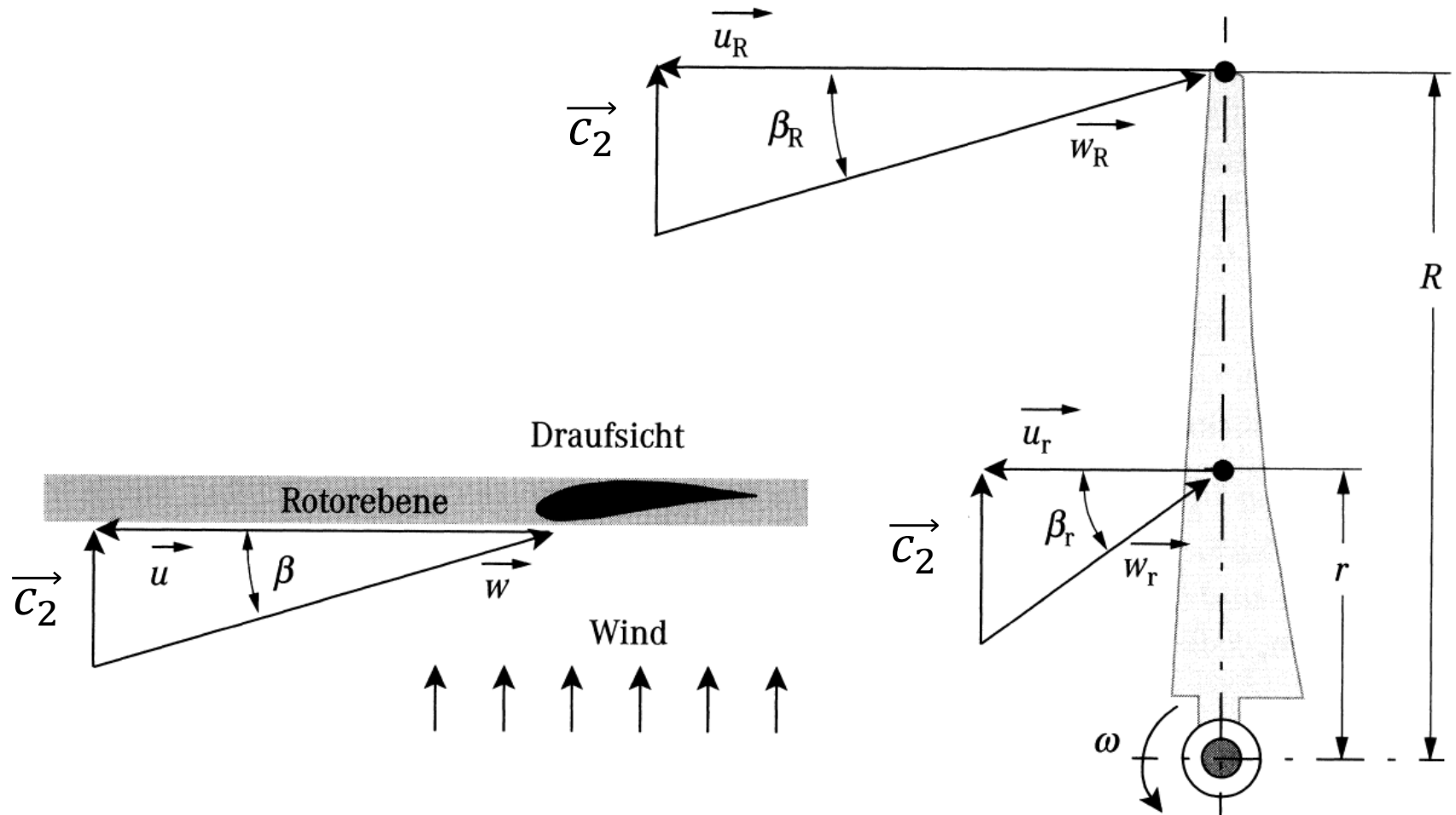
## Windgeschwindigkeit in Rotorebene

- anströmende Luft wird direkt vor der Rotorebene auf die Geschwindigkeit  $c_2$  abgebremst
- nach Betz gilt für die optimale Energieübertragung

$$c_2 = \frac{2}{3} c_1$$



## Winkelbeziehungen am Rotorblatt



Quelle: Junge, Gerd: Einführung in die Technische Strömungslehre

## rotierender Tragflügel

Umfangsgeschwindigkeit  $u$  ändert sich mit dem Radius:

$$u = \omega \cdot r$$

Damit ändert sich auch der Winkel  $\beta$  mit dem Radius.

Mit der Schnelllaufzahl folgt:  $u_r = \frac{r}{R} \cdot u_{max} = \frac{r}{R} \cdot \lambda \cdot c_1$

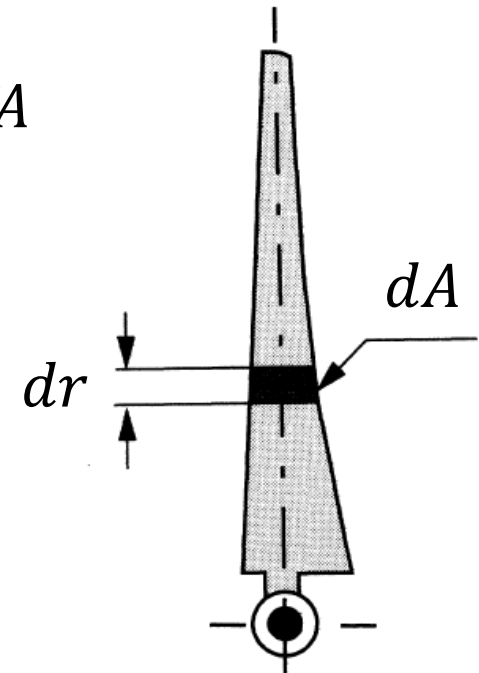
**örtliche Schnelllaufzahl:**  $\lambda_r = \frac{r}{R} \cdot \lambda$

## Kraftkomponenten

Betrachtung eines kleinen Abschnitts  $dr$  mit der Fläche  $dA$ , mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit  $u$  und optimalen Anstellwinkel  $\alpha$

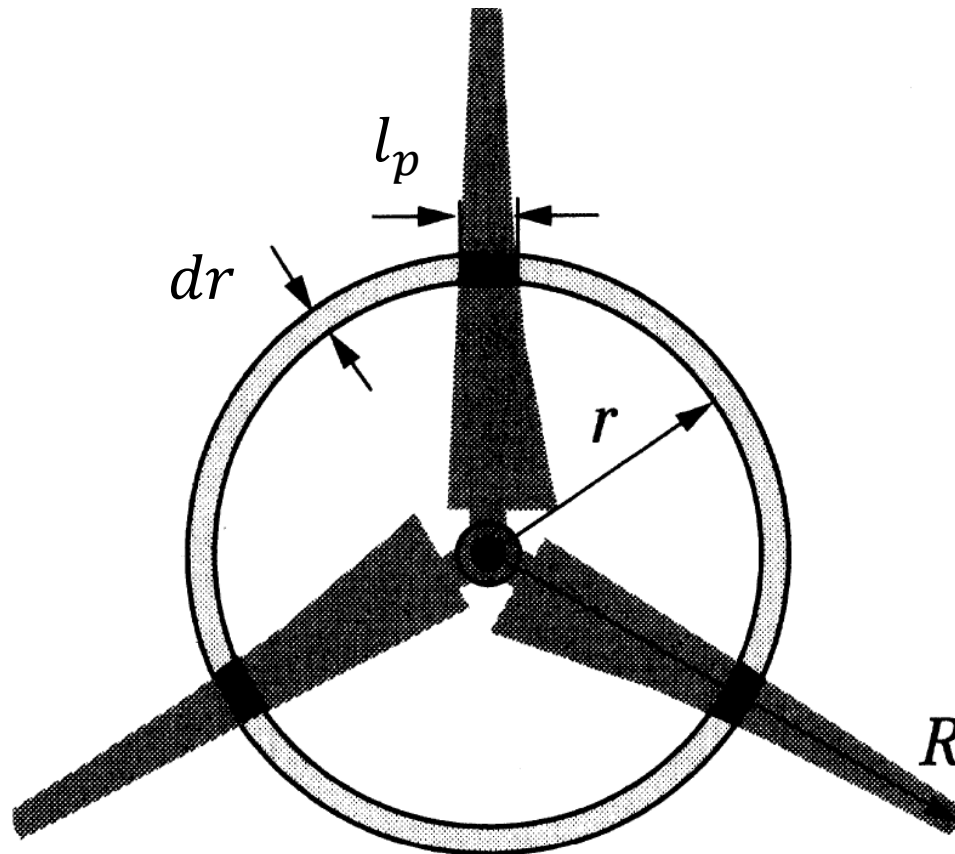
$$dF_u = (c_a \cdot \sin \beta - c_w \cdot \cos \beta) \cdot \frac{\rho}{2} w_r^2 \cdot dA$$

mit:  $dA = l_p \cdot dr$



## 11.8 Betzsche Optimalauslegung

Welche Tiefe  $l_p$  muss das Rotorblatt am betrachteten Radius für optimalen Betrieb aufweisen?



# Betzsche Optimalauslegung

für die maximale Rotorleistung gilt nach Betz:

$$c_2 = \frac{2}{3} c_1$$

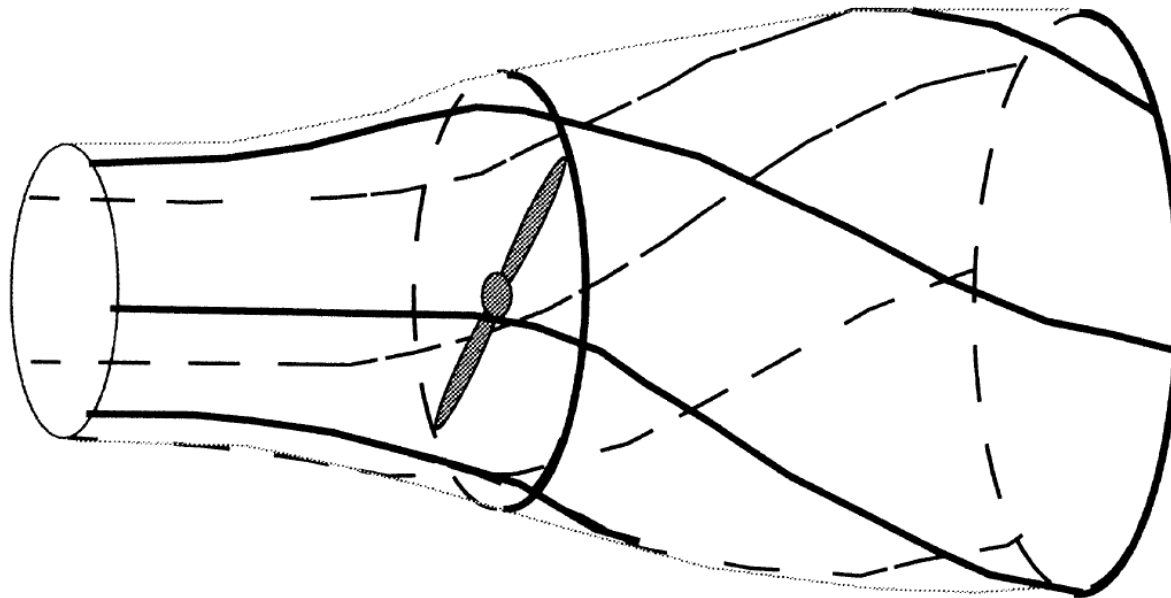
$$c_p = \frac{16}{27}$$

optimale Blatttiefe:

$$l_p(r) = \frac{8}{3} \pi \cdot \frac{1}{z \cdot c_a} \cdot \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{9}{4} \lambda_r^2}}$$

## 11.9 Drallverluste

- Abströmung vom Windrad drallbehaftet
- Drall beinhaltet erhebliche kinetische Energie
- geht bei Leistungsübertragung am Rotor verloren = Verlust



Quelle: Junge, Gerd: Einführung in die Technische Strömungslehre

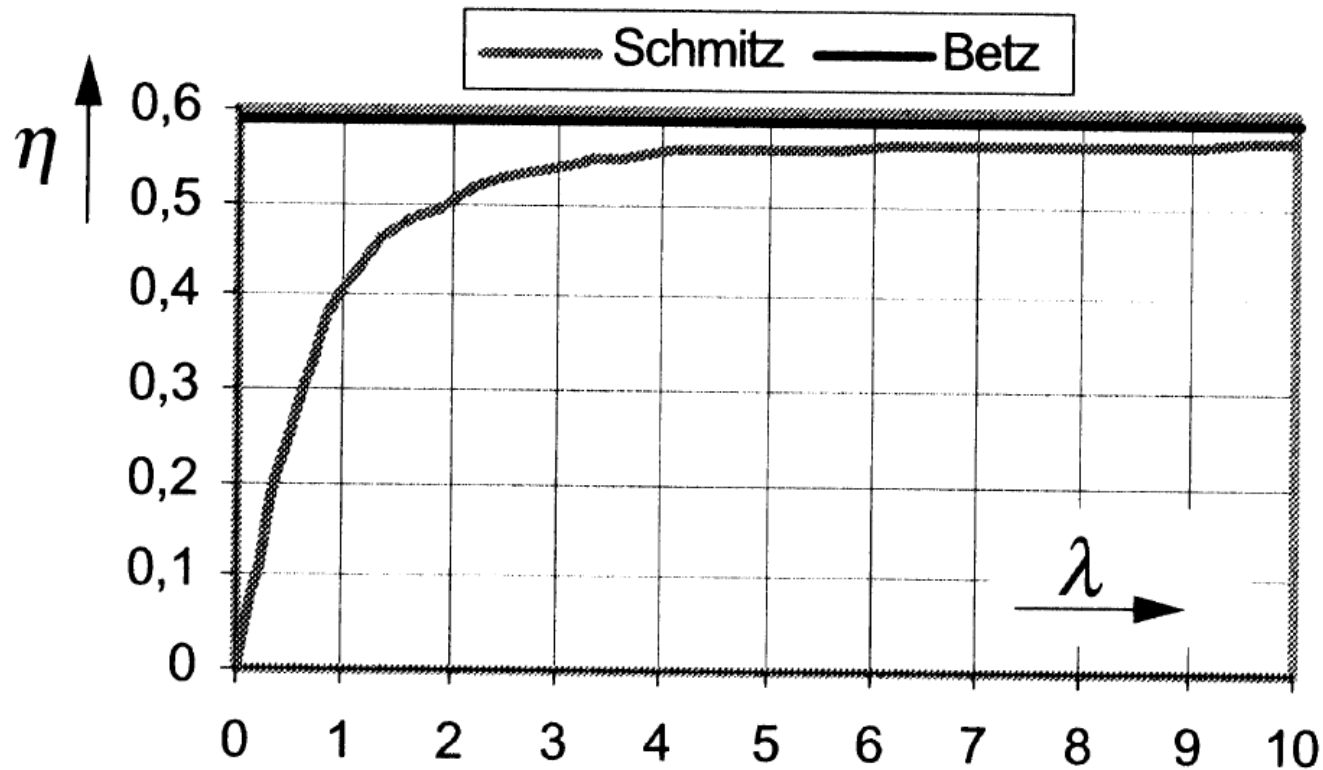
# Drallverluste

- Drall wächst proportional mit Drehmoment am Rotor
- Verringerung der Drehmomente verringert Drallverluste, die Drehzahl muss dann für bestimmte Leistungsentnahme erhöht werden:

$$P_{Rot} = M \cdot \omega$$

- Betz-Theorie vernachlässigt die Drallverluste

- Theorie von Schmitz berücksichtigt Drallverluste
- mit steigender Schnelllaufzahl sinken die Drallverluste



Quelle: Junge, Gerd: Einführung in die Technische Strömungslehre