

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Windturbinen und alternative Energiequellen

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen



- Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)
- Energieinhalt im Wind und Aufbau von Windkraftanlagen (Vorlesung 2)
- Grundlagen der Aerodynamik (Vorlesung 3)
- Windentstehung und Messung der Windgeschwindigkeit (Vorlesung 4)
- Grundlagen für den Rotorentwurf (Vorlesung 5)

- Entwurf und aerodynamische Optimierung des Rotors (Vorlesung 5,6)
- **Anpassung an veränderte Windverhältnisse und Verluste (Vorlesung 7)**
- Grundlagen der Aeroelastik, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (Vorlesung 8,9)
- Schallquellen an Windkraftanlagen und Maßnahmen zur Lärmreduzierung (Vorlesung 10)

- spezielle Herausforderungen an offshore-Windparks (Vorl. 11)
- Gezeitenturbinen (Vorlesung 12)
- Solarthermie und Photovoltaik (Vorlesung 13)
- Geothermie (Vorlesung 14)
- Zusammenfassung (Vorlesung 14)



- Profilverluste
- Blattspitzen- und Nabenverluste
- Drallverluste

- Profilverluste

Tafelbild

$$dP = z \cdot \omega \cdot d\vec{F}_u$$

$$= z \cdot \omega r \left(0,5 \cdot w^2 \cdot l_p \cdot dr (c_A \sin\beta - c_w \cos\beta) \right)$$

$$dP_{\text{verlustfrei}} = z \cdot \omega \cdot r \cdot 0,5 \cdot w^2 \cdot l_p \cdot dr \cdot c_A \cdot \sin\beta$$

$$\eta_{\text{Profil}} = \frac{dP}{dP_{\text{verlustfrei}}} = 1 - \frac{c_w}{c_A} \cdot \frac{1}{\tan\beta} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_A}{\varepsilon_{wT}}$$

$$\varepsilon_{wT} = \frac{c_A}{c_w}$$

Tafelbild



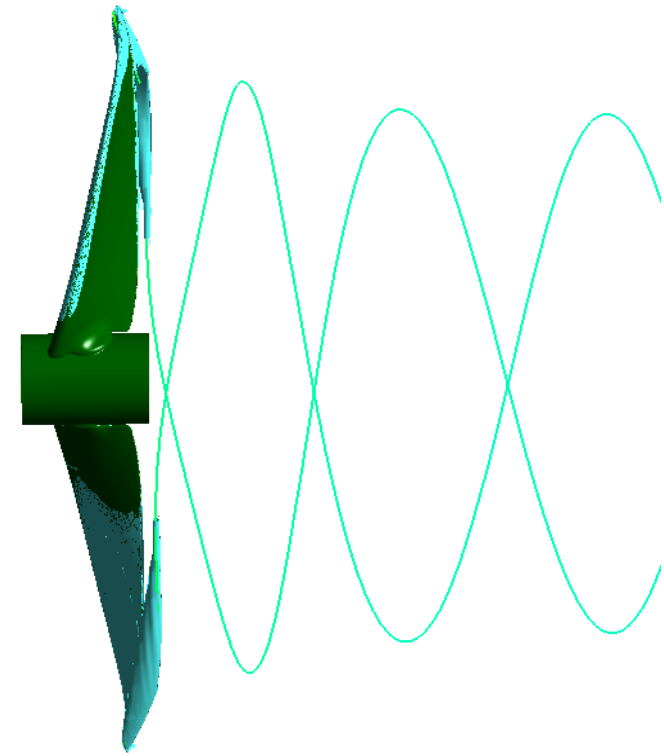
- Blattspitzen- und Nabenverluste

Tafelbild

Blattspitzenwirbel aus der Simulation einer
Propulsionseinrichtung

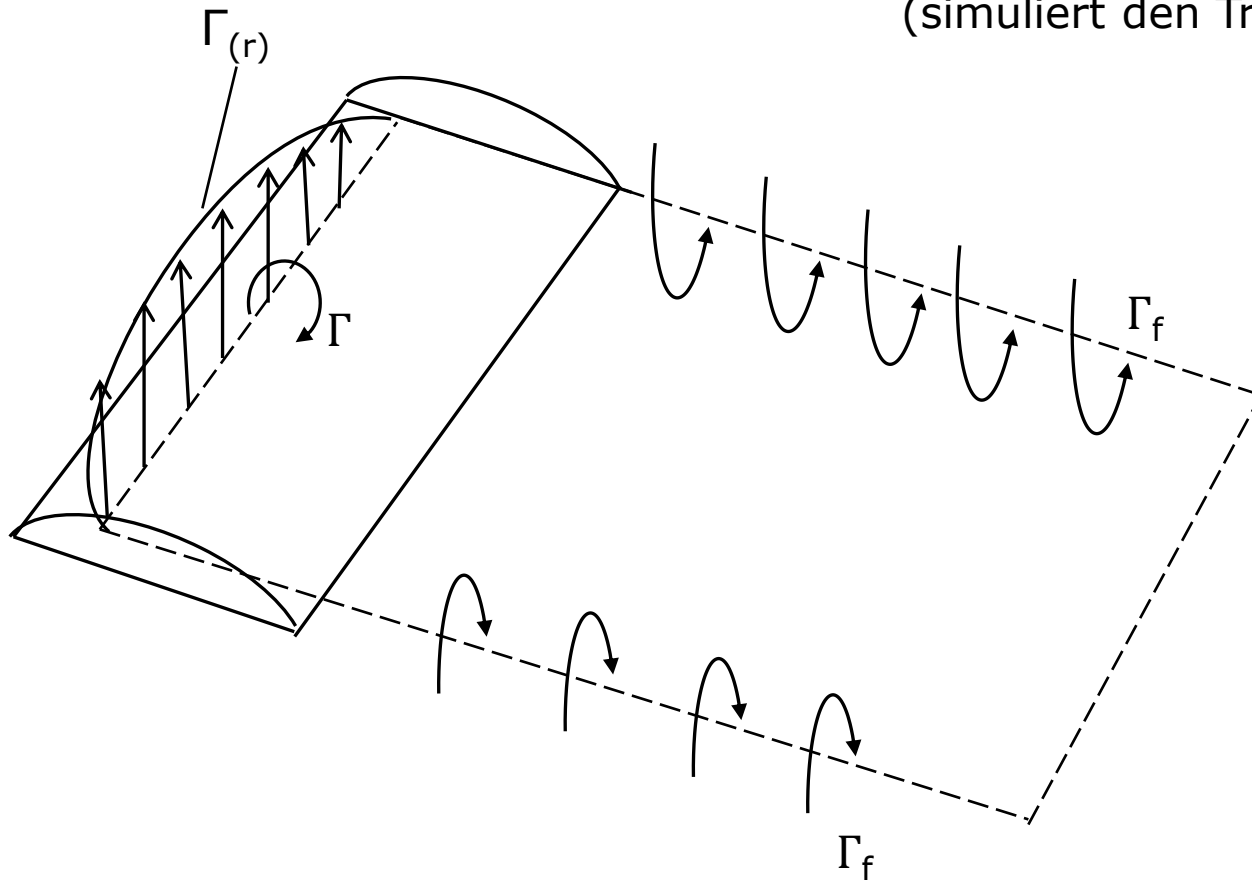


Absolute Helicity

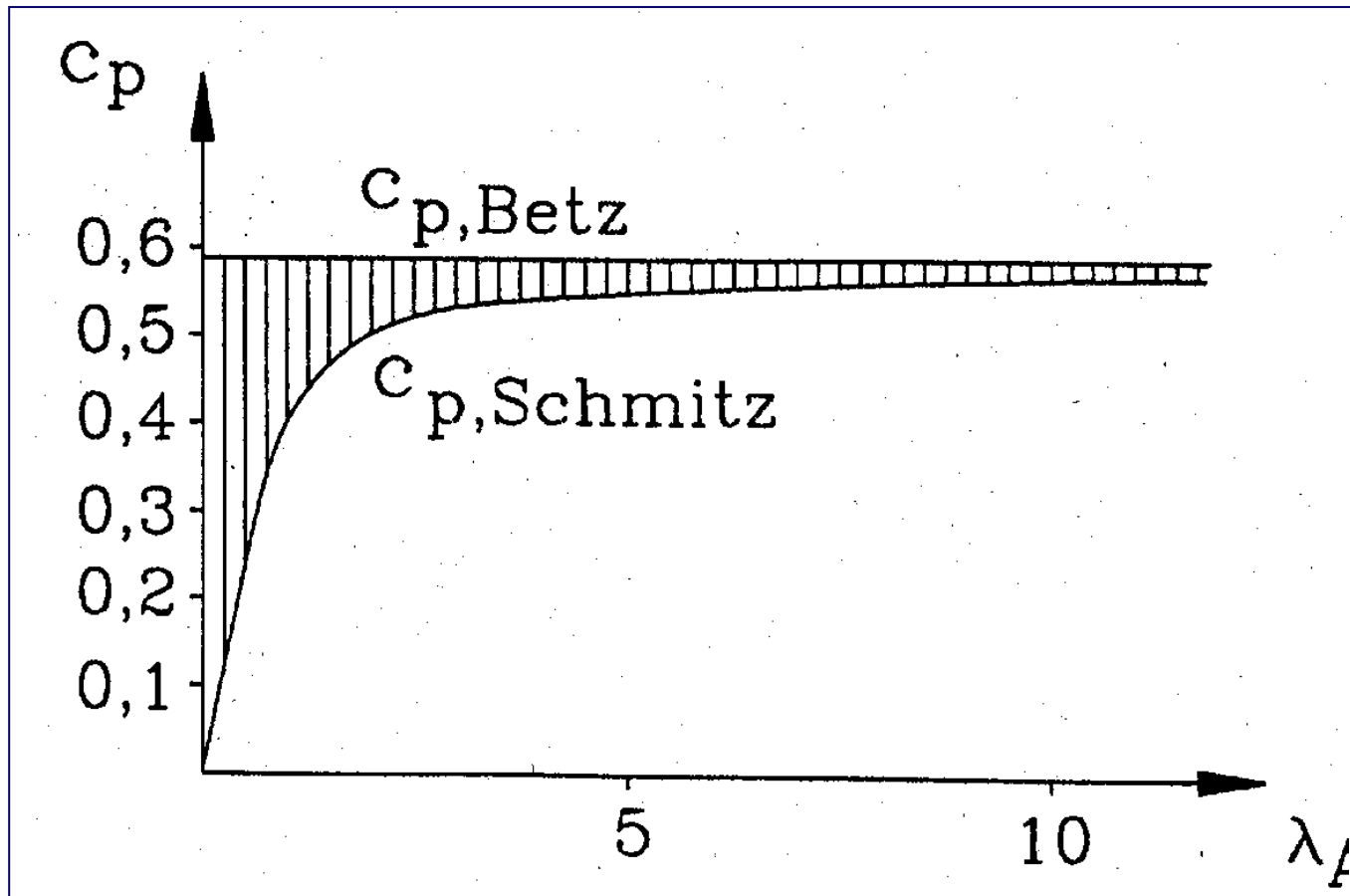


Streamlines for tip vortex

$\Gamma_{(r)}$...Zirkulation des gebundenen Wirbels
(simuliert den Tragflügel)



$\Gamma_{(f)}$...freie Wirbel



Leistungsbeiwert nach Betz (ohne) und Schmitz (mit Nachlaufdrall). Die schraffierte Ecke stellt die Drallverluste dar.

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

Tafelbild

Berücksichtigung des Dralls im Nachlauf der Turbine

$$C_u = 0 \quad \text{vor dem Rotor}$$

$$C_u \neq 0 \quad \text{hinter dem Rotor}$$

$$\vec{u} = \omega \cdot r + \frac{\Delta c_u}{2}$$

Mittelwert aus

c_u vor dem Rotor und c_u nach dem Rotor \longrightarrow in der Rotorebene $c_u/2$



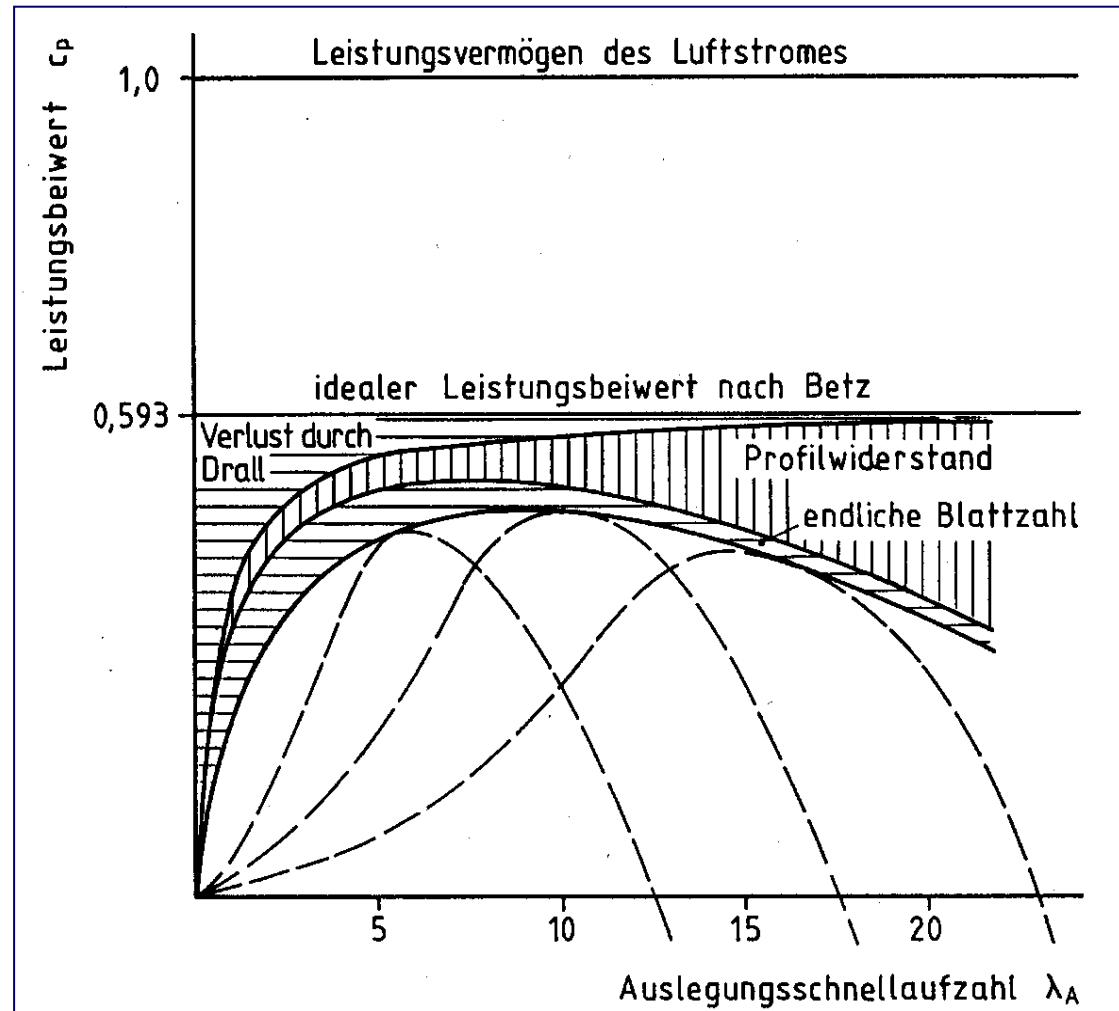
Schmitz, G.: Theorie und Entwurf von Windrädern optimaler Leistung. Wiss. Zeitschrift der Universität Rostock, 1955/56

Ergebnis sind entsprechend der induzierten Geschwindigkeiten angepasste Anstellwinkel und Profiltiefen.

Tafelbild

Stufenweise Annäherung der realen Rotorleistungskennlinie durch die Theorie

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag



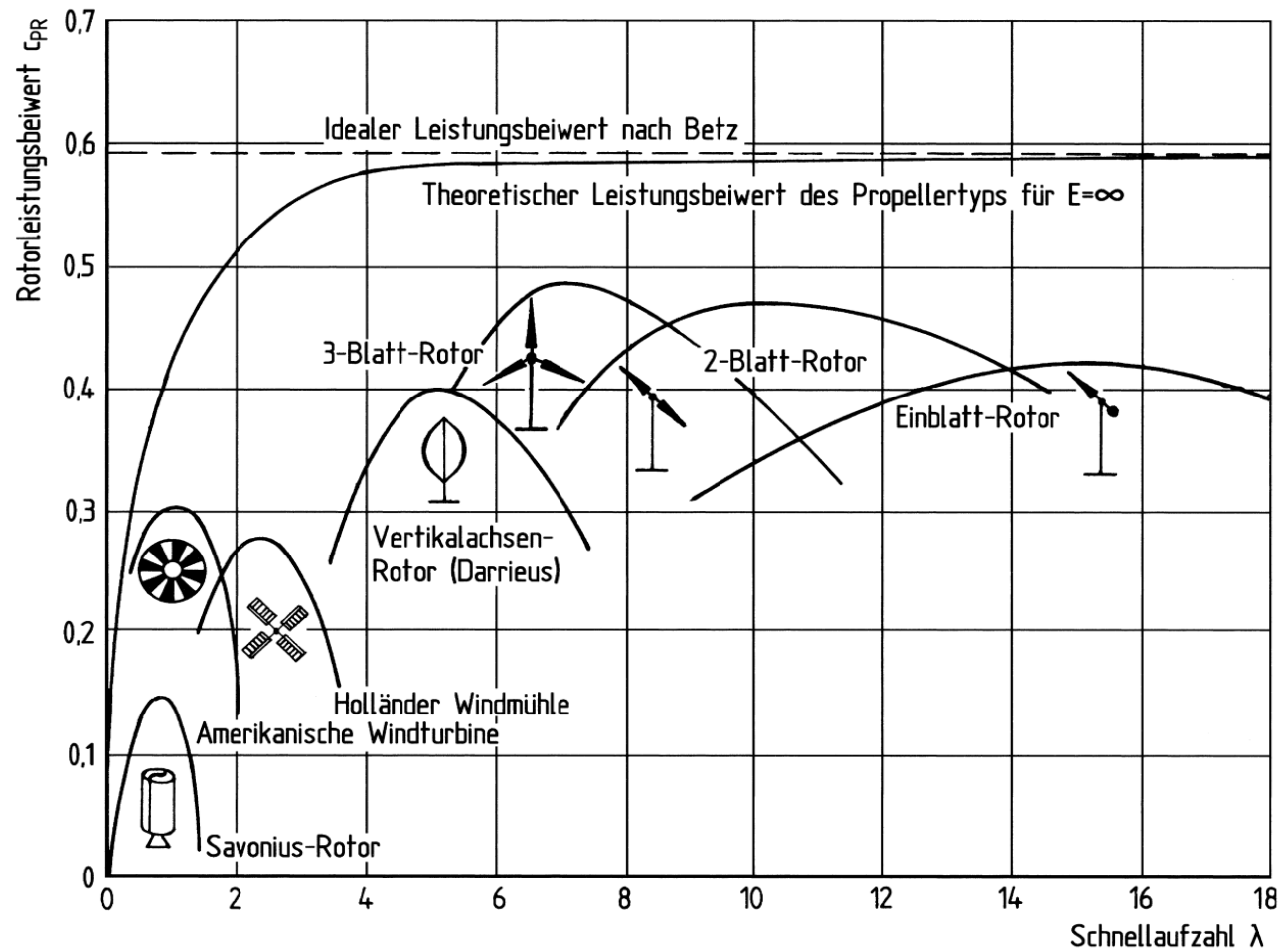


Bild 5.14: Rotorleistungsbeiwerte von Windrotoren unterschiedlicher Bauart [4]

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

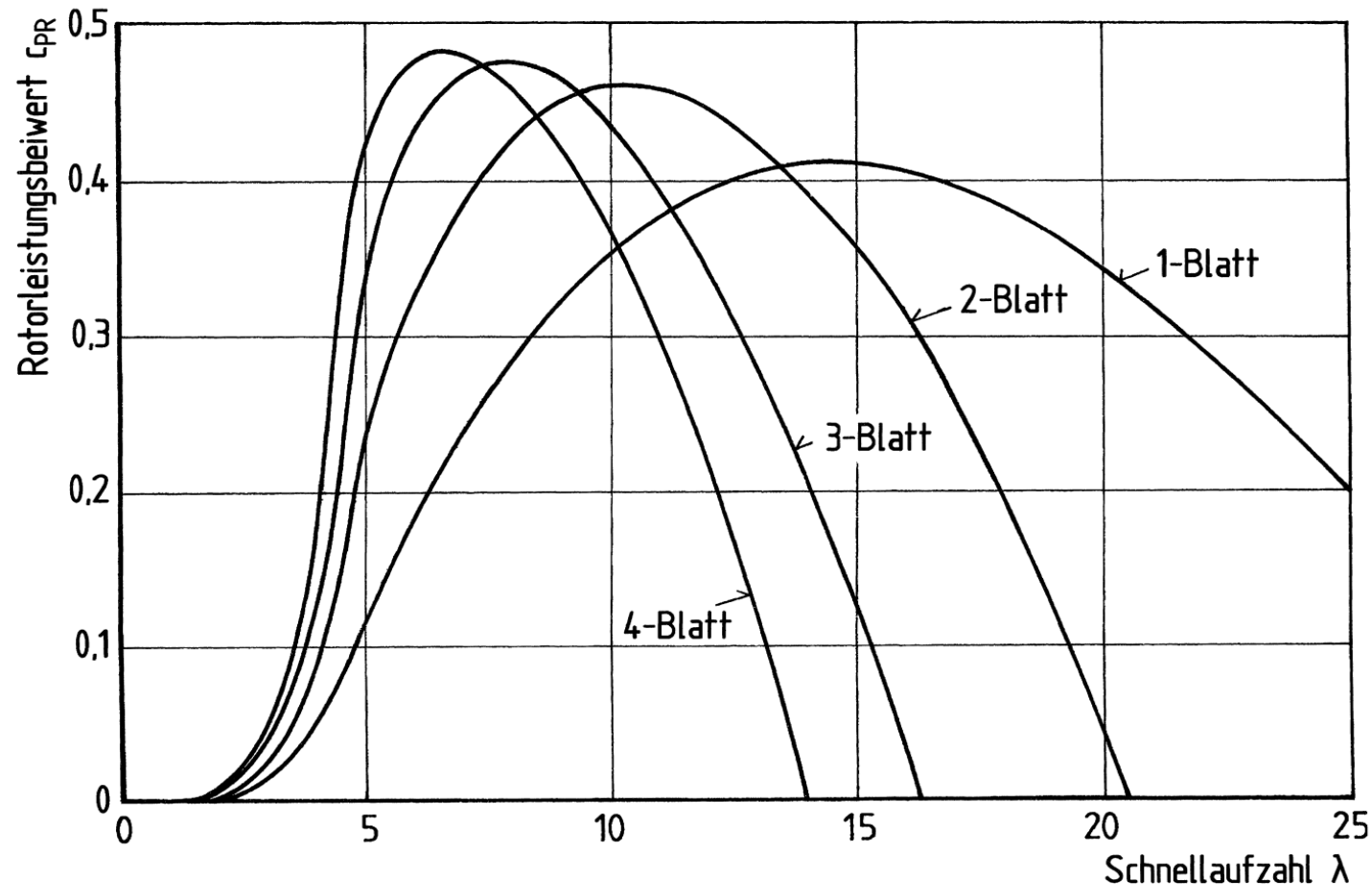


Bild 5.44: Einfluß der Rotorblattzahl auf den Verlauf des Rotorleistungsbeiwertes (Einhüllende) und die optimale Schnellaufzahl (berechnet für die Experimentalanlage WKA-60 mit dem aerodyn. Profil NACA 4415)

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Anpassung an veränderte Windverhältnisse



- Änderung der Windrichtung
- Änderung der Windgeschwindigkeit

Tafelbild

Auswirkungen:

- Fehlanströmung der Profile (Auftriebs- und Widerstandsbeiwert ändern sich)
- Energieumwandlung verschlechtert sich drastisch

Kompensation:

- „in den Wind drehen“ des Rotors durch Drehen der gesamten Gondel

Auswirkungen:

- Fehlanströmung der Profile (Auftriebs- und Widerstandsbeiwert ändern sich)

Kompensation:

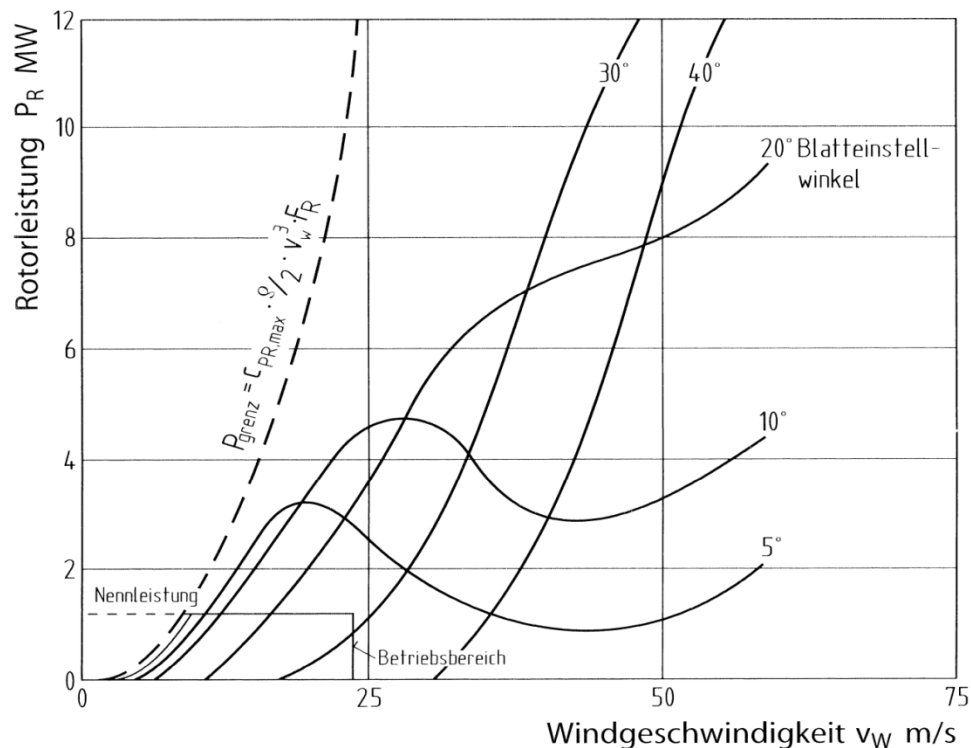
- Drehen der Rotorblätter (pitchen)

Tafelbild

maximal erlaubte Windgeschwindigkeit/ Notwendigkeit einer Leistungs- begrenzung

Auswirkungen immer weiter steigender Windgeschwindigkeit:

- Rotordrehzahl und/oder mechanische Belastung der Rotorblätter oder anderer Bauteile wird zu groß



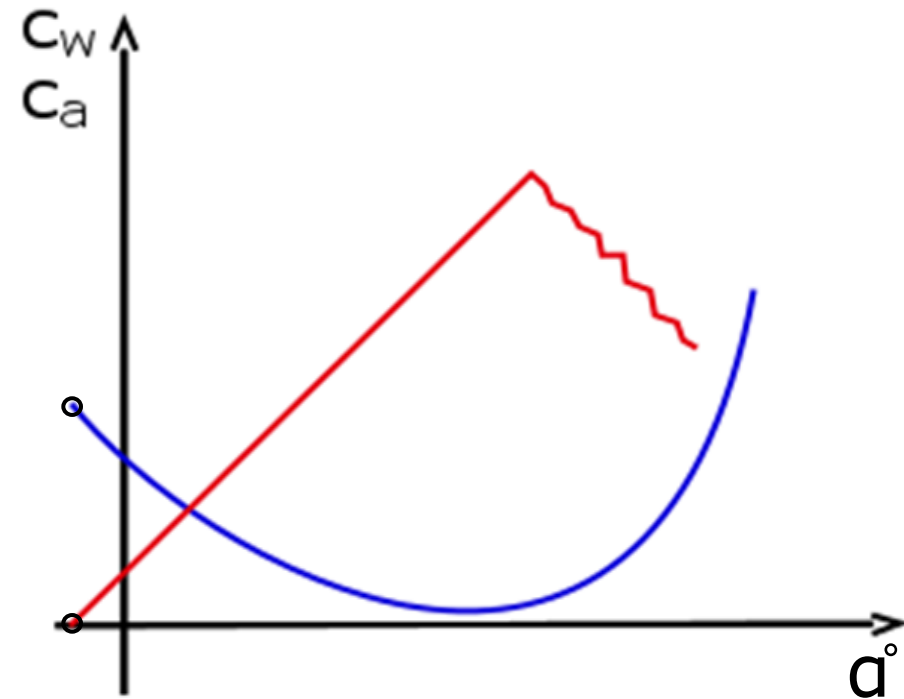
Anpassung der WKA an Änderungen der Windgeschwindigkeit

- Stall-Regelung
- Pitch-Regelung
- Gier-Regelung

Tafelbild

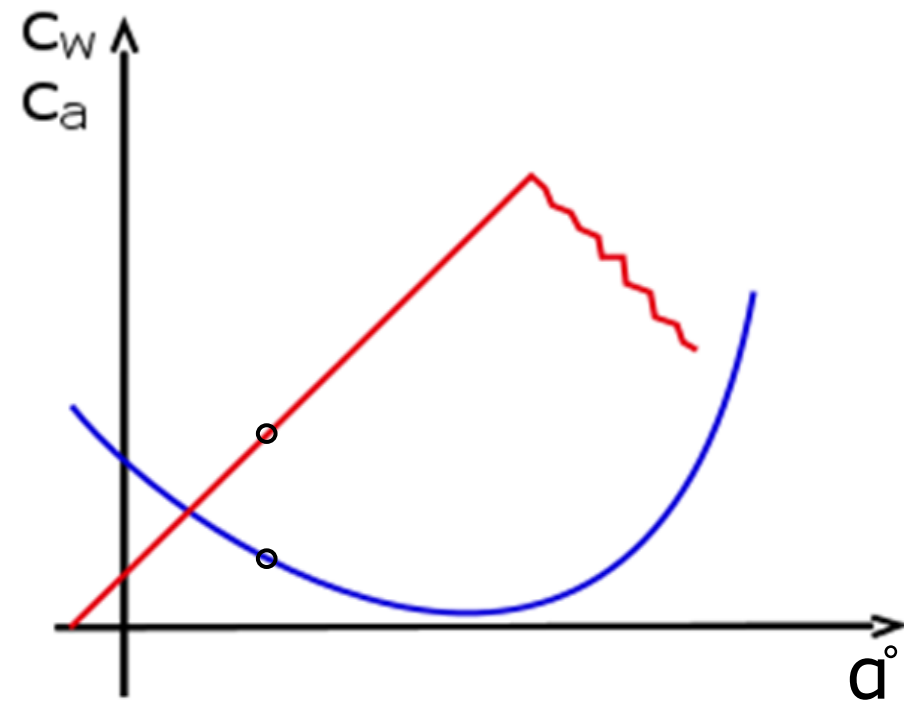
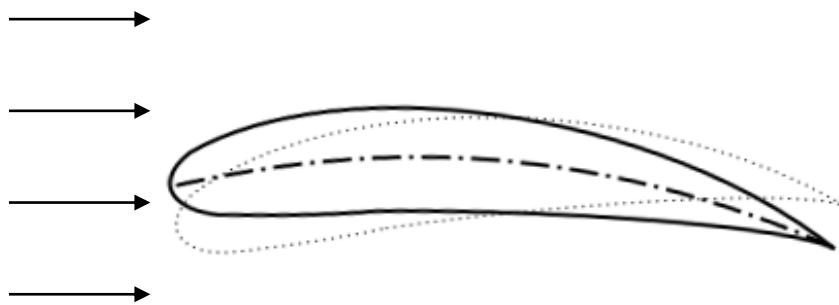
Anstellung -3°

Wind
→
→
→
→



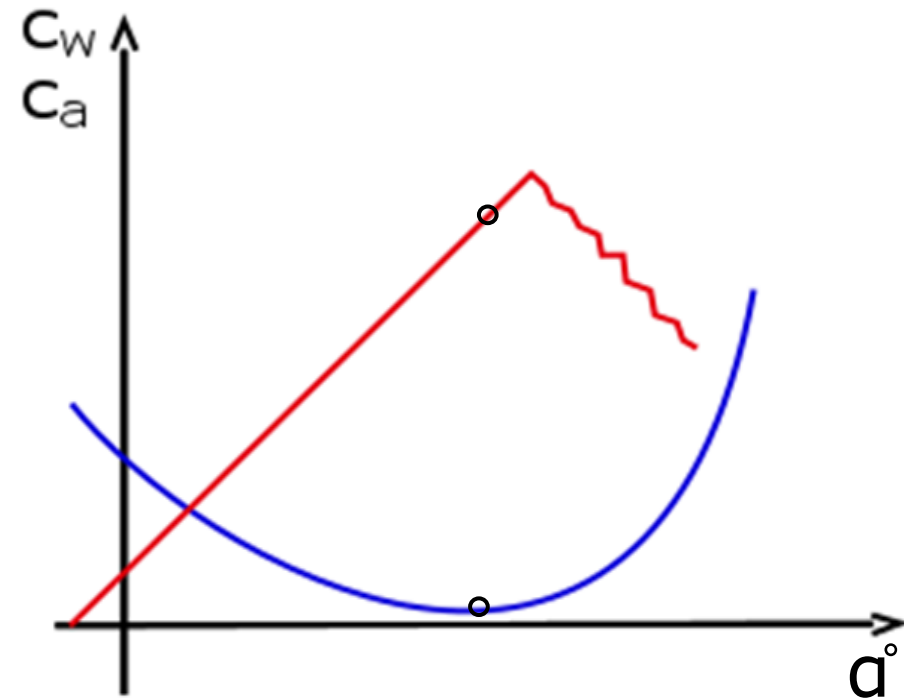
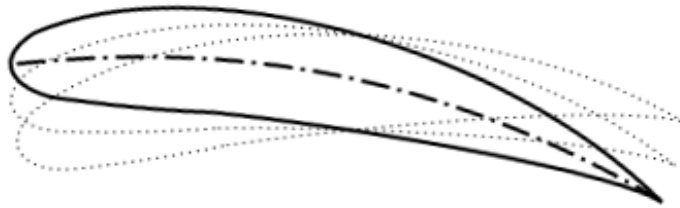
Anstellung 5°

Wind



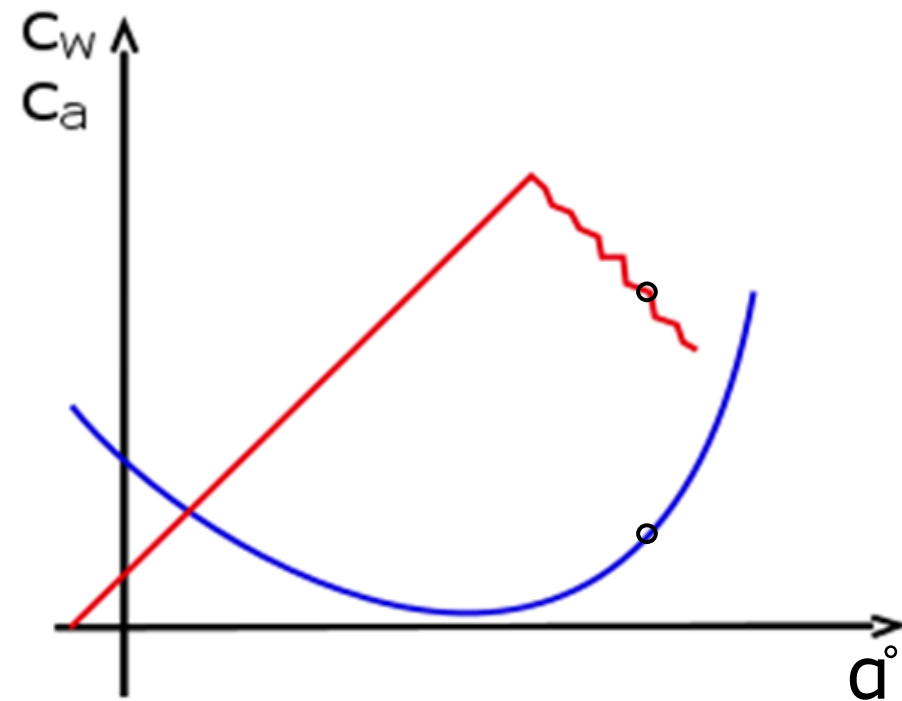
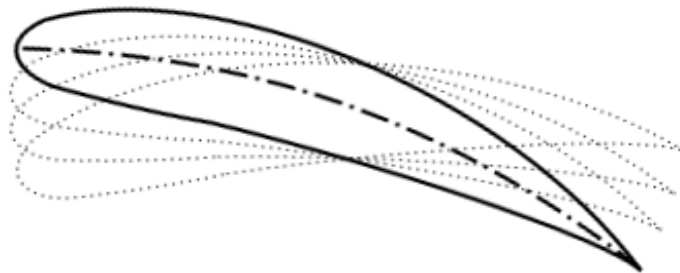
Anstellung 12°

Wind
→
→
→
→



Anstellung 20°

Wind
→
→
→
→



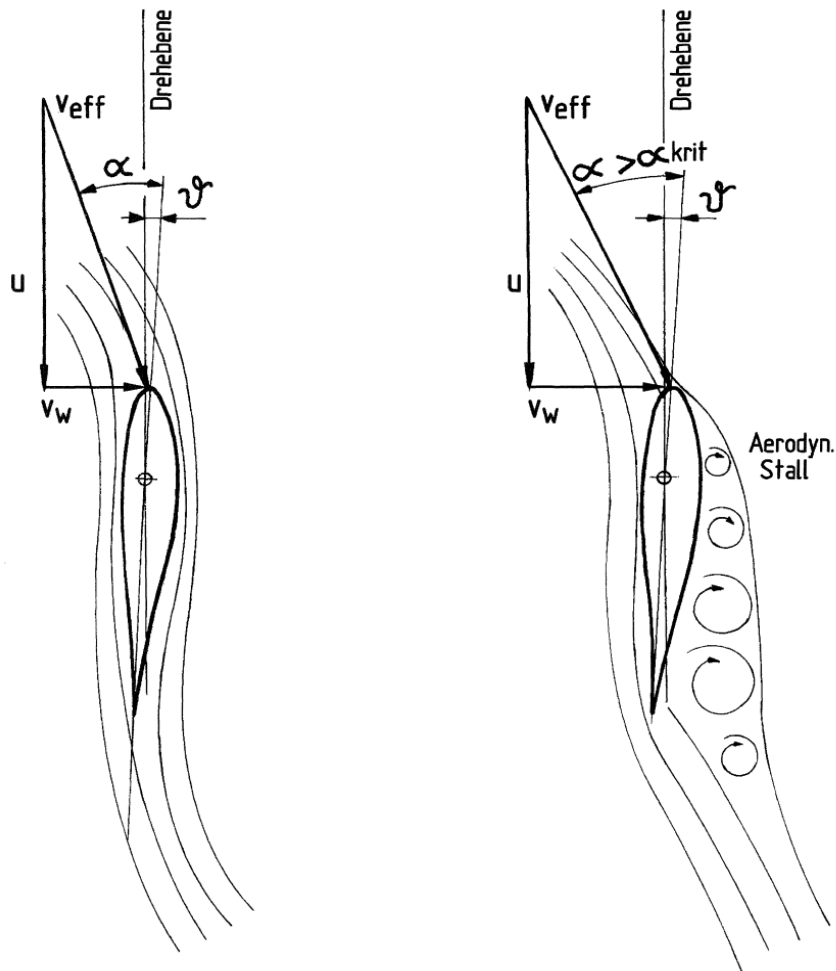


Bild 5.23: Ablösung der Strömung am Rotorblatt ohne Verstellung des Blatteinstellwinkels bei zunehmender Windgeschwindigkeit und festgehaltener Rotordrehzahl
Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Tafelbild

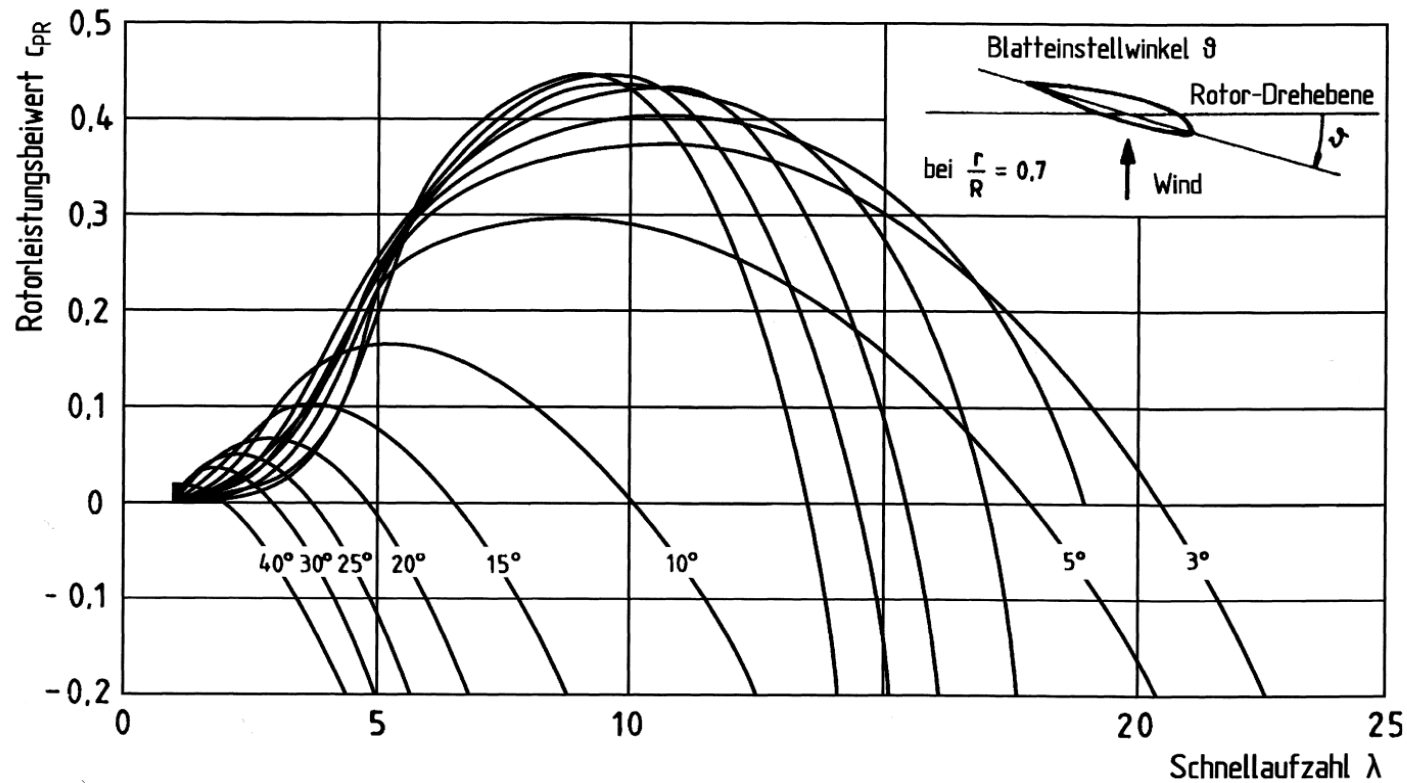


Bild 5.12: Rotorleistungskennfeld der Experimentalanlage WKA-60 (Rotorblattprofil NACA 4415)

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Wirkung des Drehens des Rotors aus dem Wind aus dem Wind

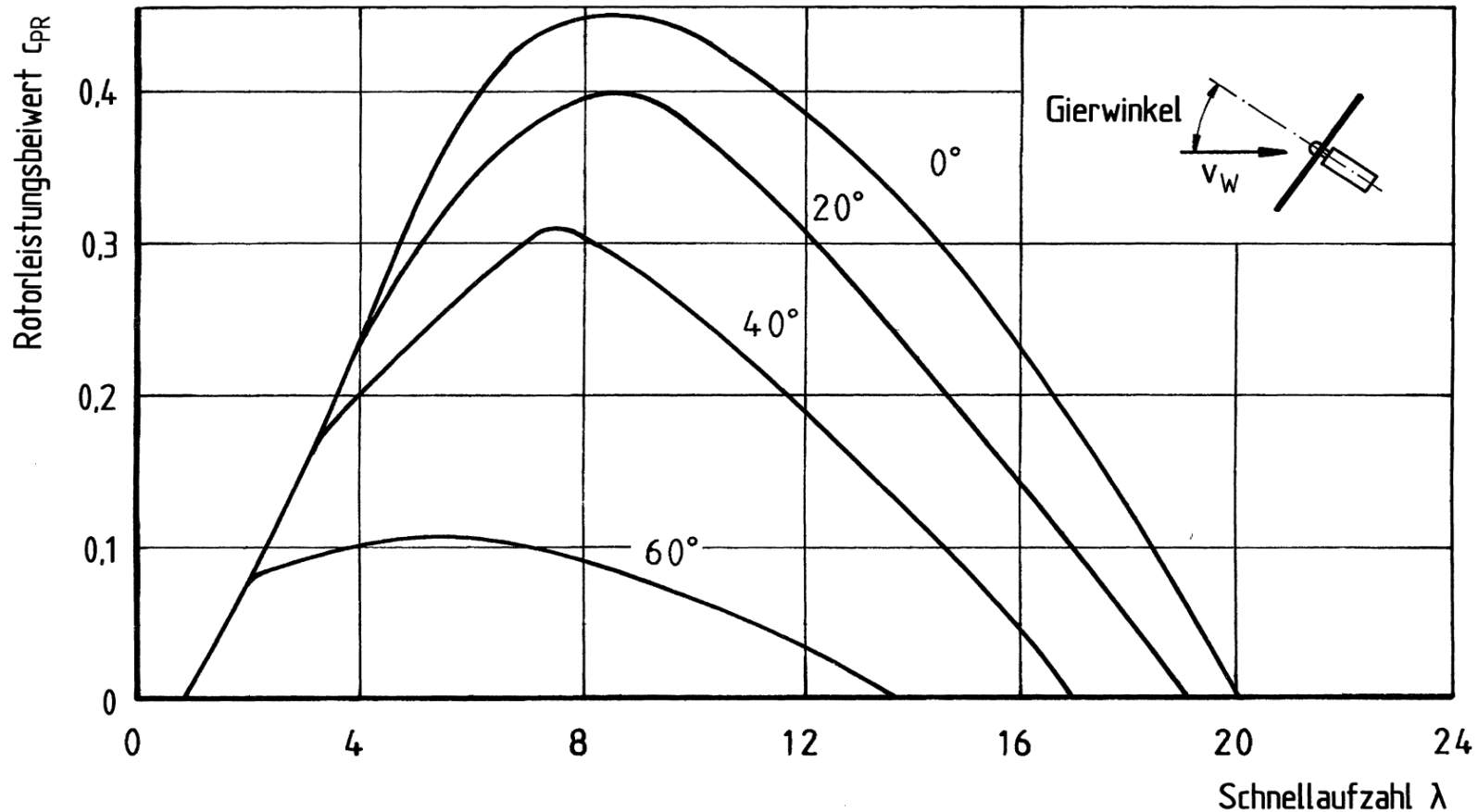


Bild 5.30: Verringerung des Rotorleistungsbeiwertes bei zunehmender Schräganströmung (Gierwinkel) [18]

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

- maximale Erzeugung elektrischer Energie bei minimalen aerodynamischen und mechanischen Verlusten
- schnelles und sicheres An- und Abfahren der Anlage
- Realisierung von Sicherheitsfunktionen