



EIFER

EUROPÄISCHES INSTITUT FÜR ENERGIEFORSCHUNG
INSTITUT EUROPEEN DE RECHERCHE SUR L'ENERGIE
EUROPEAN INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH

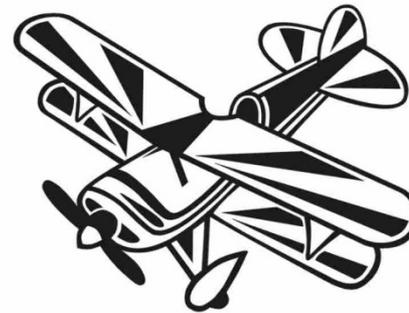
Aerodynamische Grundlagen

KIT

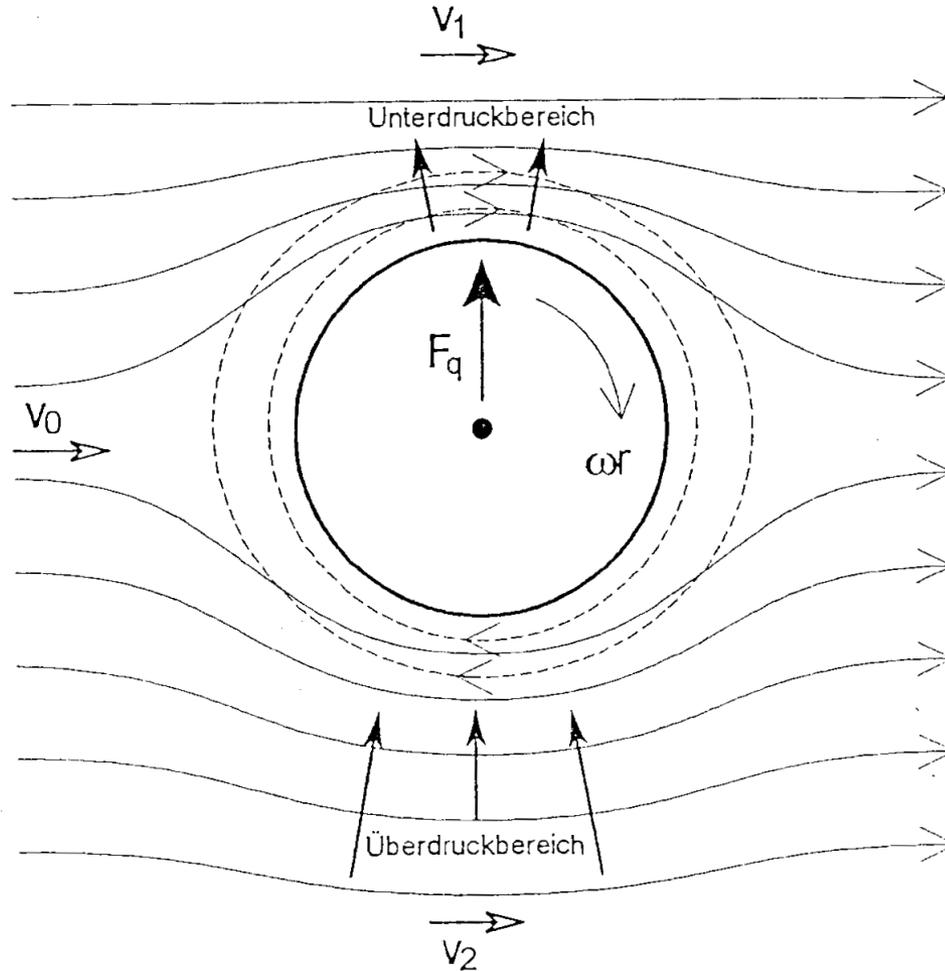


- Auftrieb ?
- Betz und die Realität
- Beiwerte
- Leistungsregelung ?
- Geschwindigkeitsdreiecke

Auftrieb



Flettnerrotor & Bernoulli



$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \text{const.}$$

- Inkompressibilität
- Trajektorie
- Stationarität
- Reibungsfreiheit
- Keine weiteren Kräfte

Beschreibt Strömung um Tragfläche genau genug bis etwa 300 km/h

$$v_1 = v_0 + \omega r \quad v_2 = v_0 - \omega r \quad (\text{mit } \omega r \ll v_0)$$

$$F_q = \zeta \cdot \omega r \cdot v_0 \cdot r \cdot l = \zeta \cdot r^2 \cdot l \cdot v_0 \cdot \omega$$

Flettner's Visionen und Realitäten



Buckau



Barbara



Enercon E-Ship



Baden-Baden

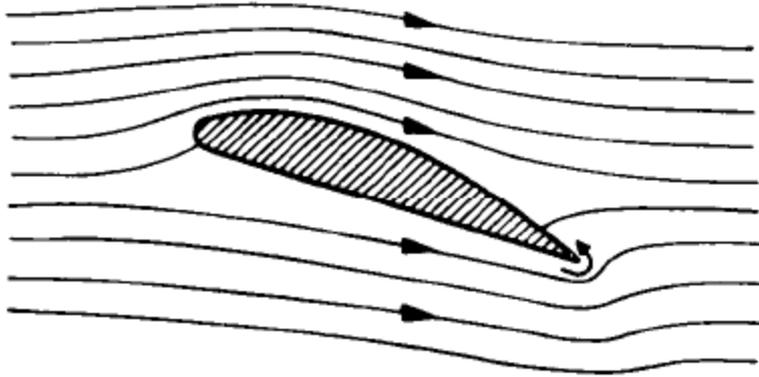


Acyone

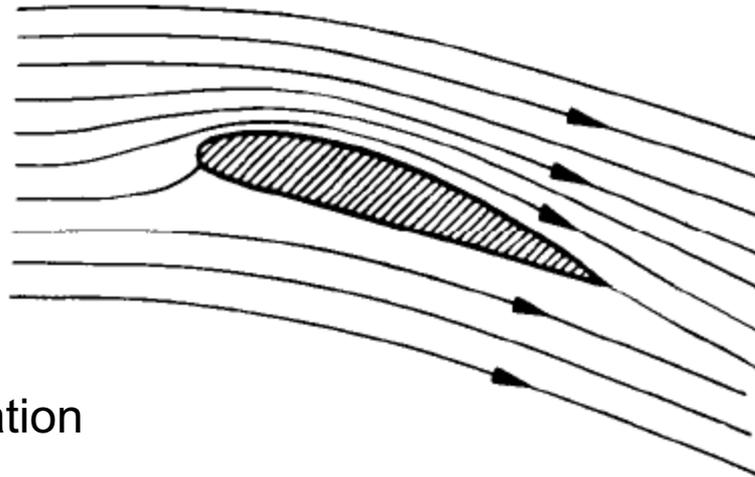


Thom-Rotorshiff

Strömungsbild - Zirkulation



Ohne Zirkulation

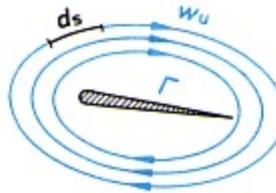


Mit Zirkulation

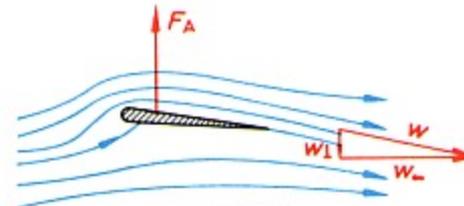
Zusammengesetzte Strömung / Zirkulation



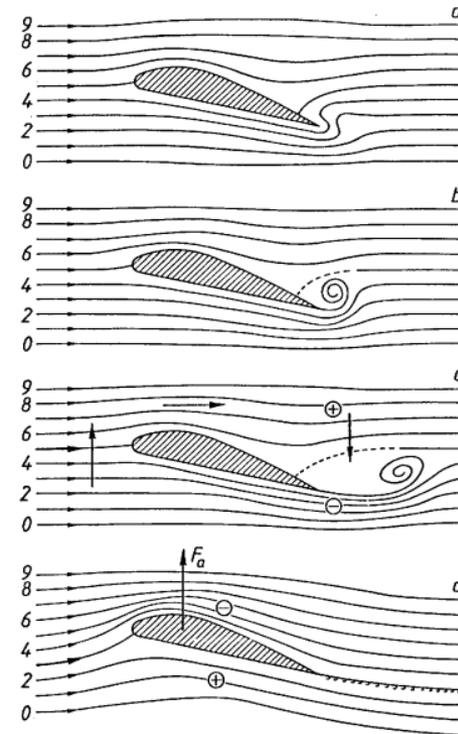
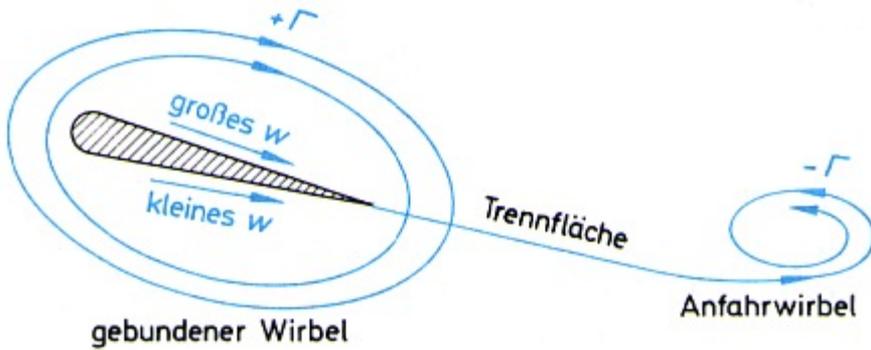
Parallelströmung



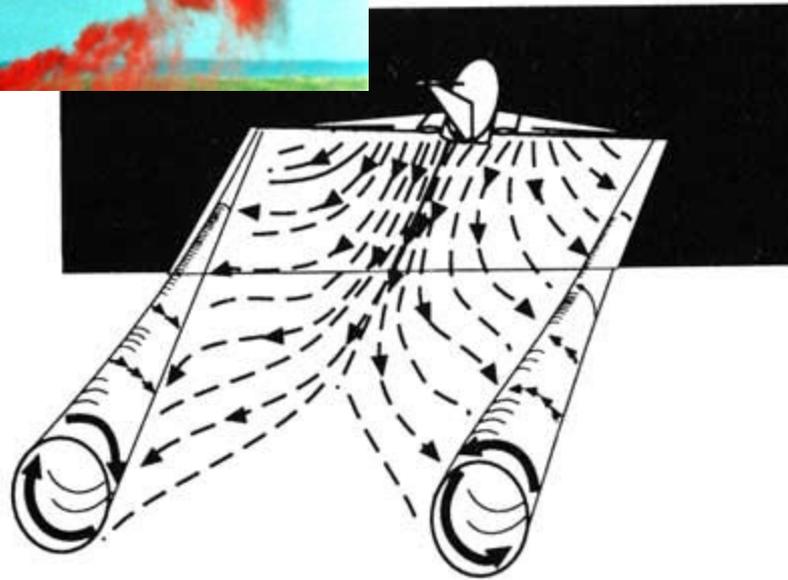
Zirkulationsströmung



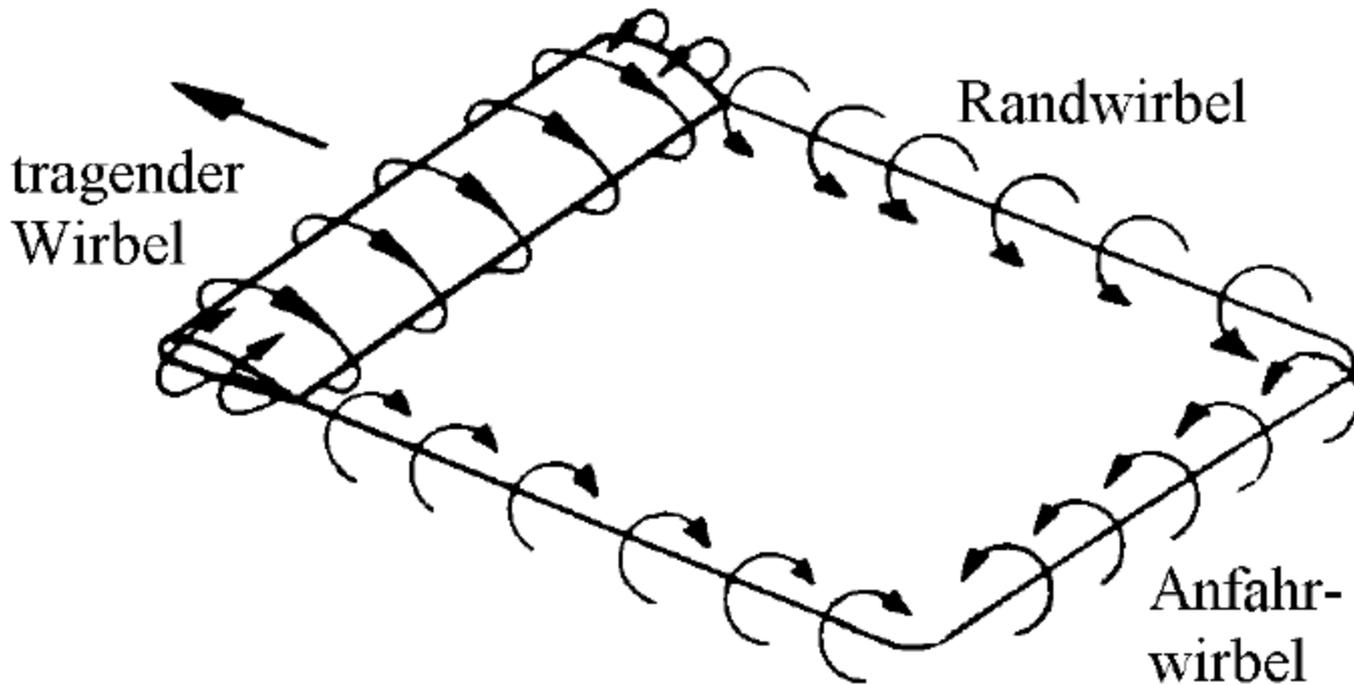
zusammengesetzte Strömung



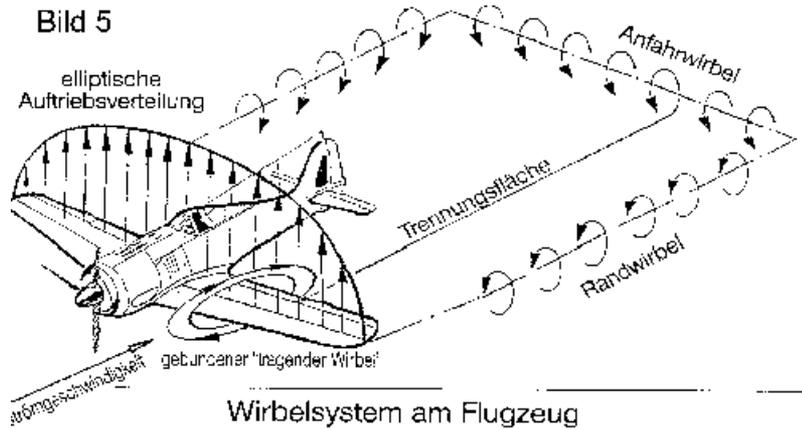
Randwirbel



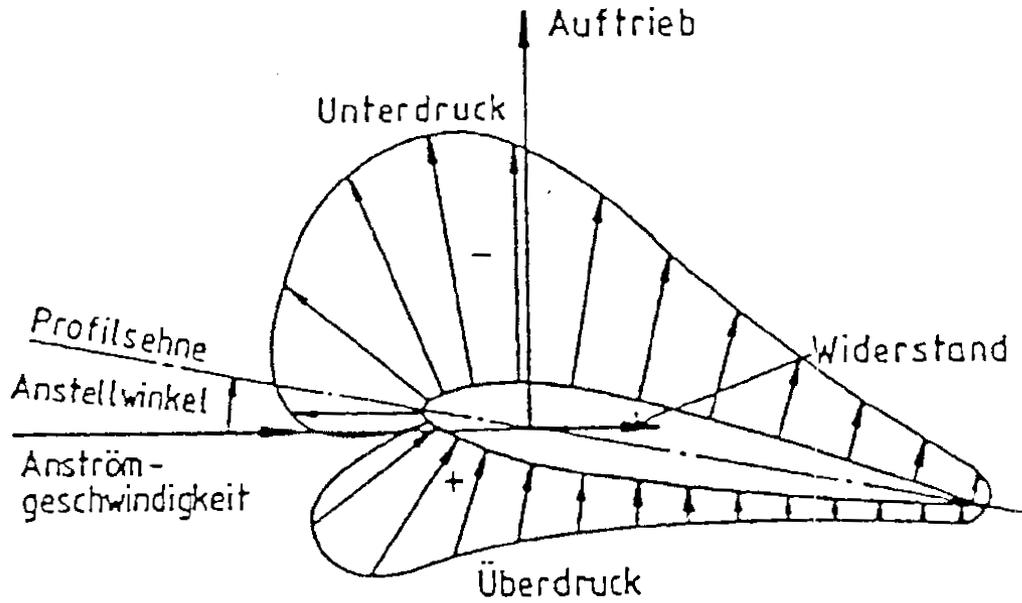
3D Wirbel



3D Wirbel / Induzierter Widerstand

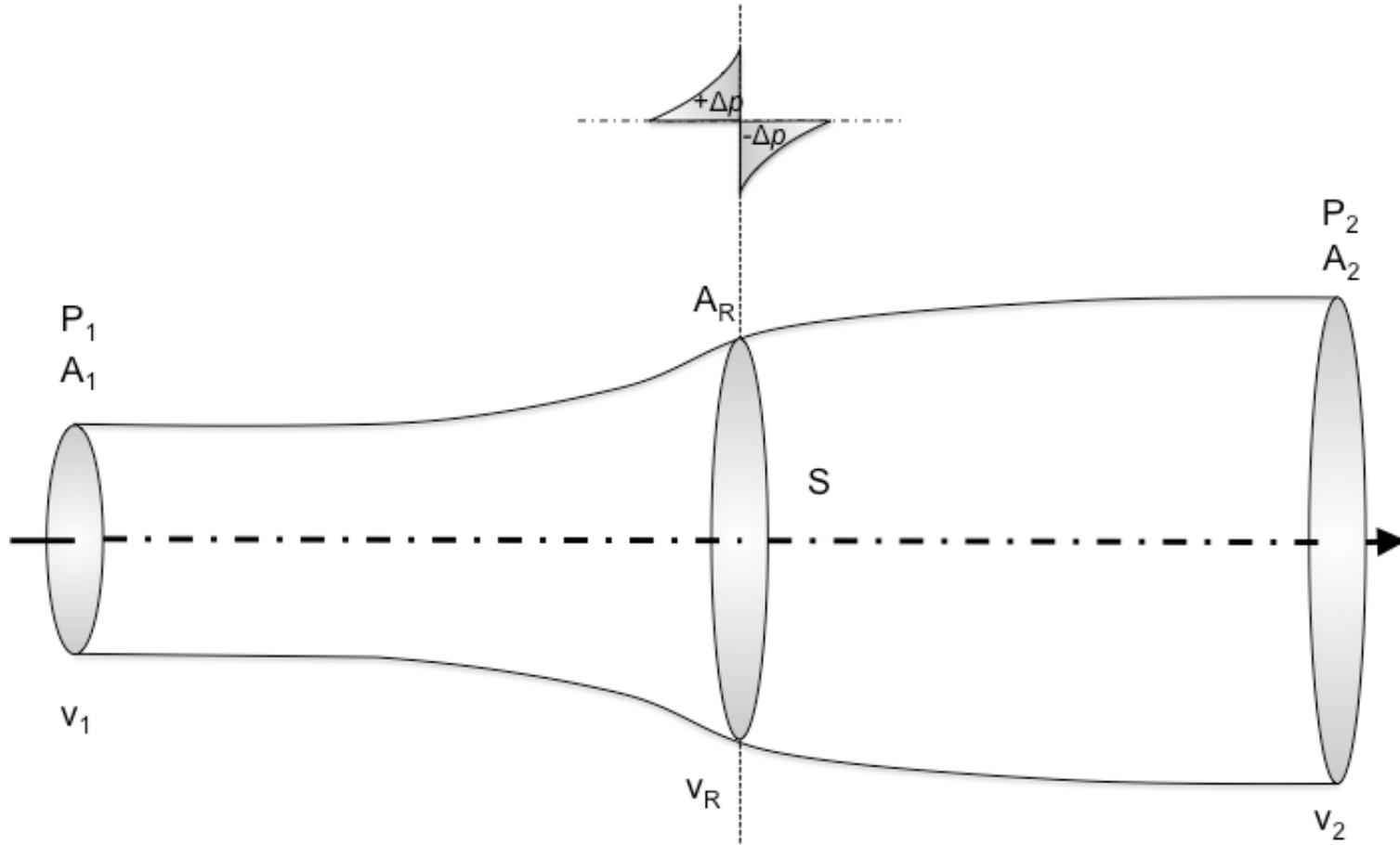


Luftkräfte am Profil



Betz

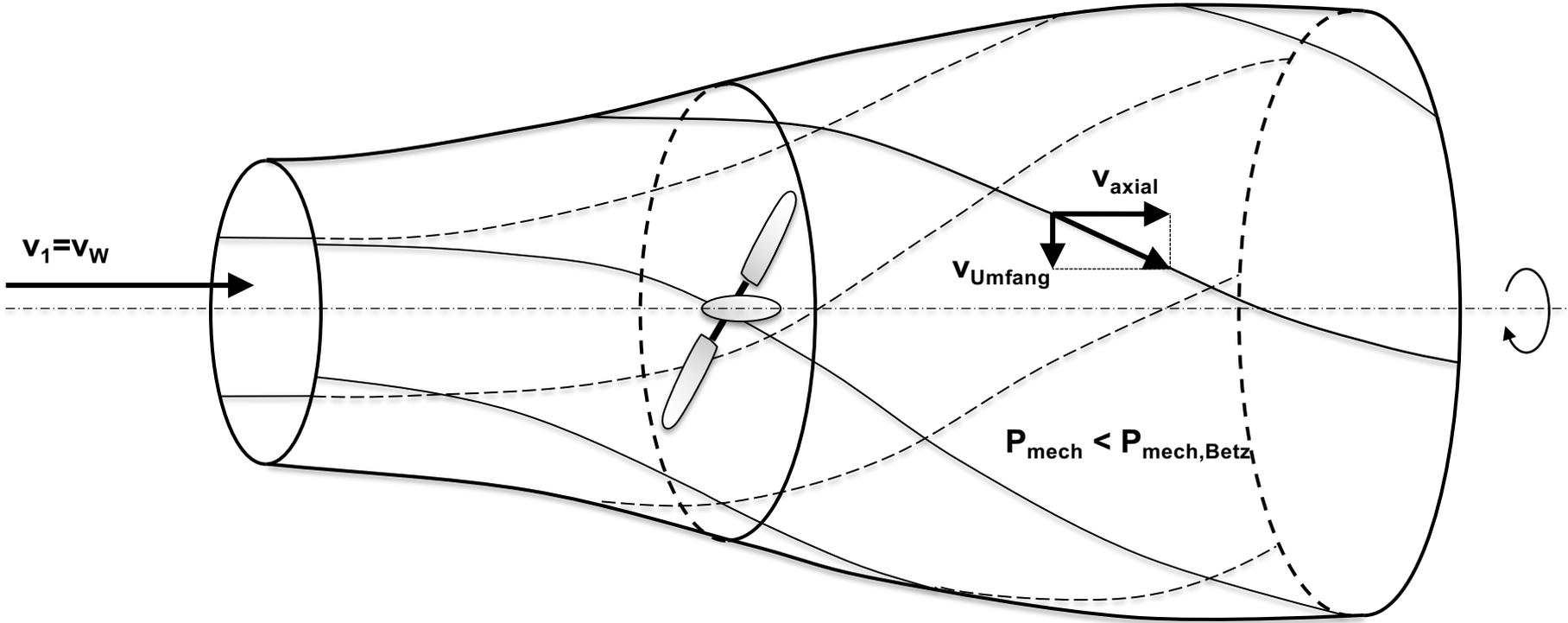
Stromlinienverlauf 2D (Strömungsflasche)

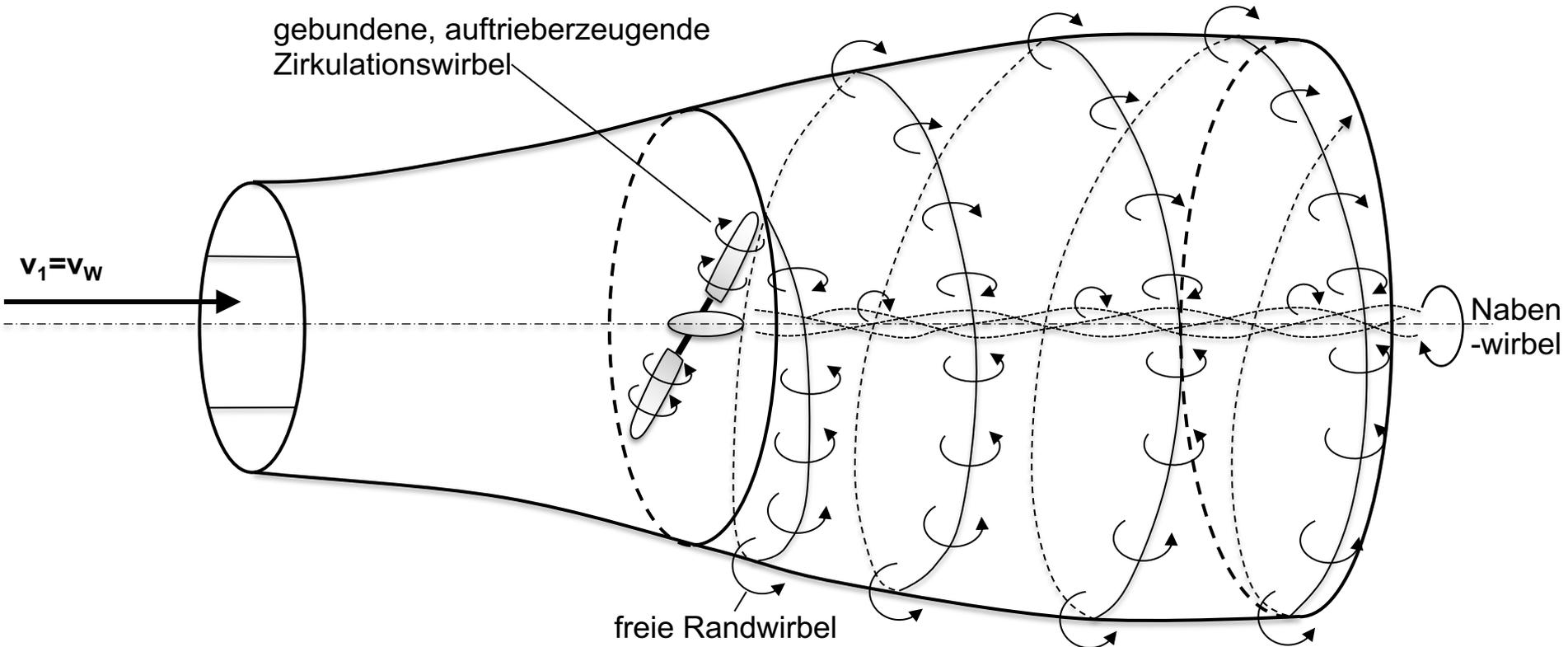


$$c_P = \frac{P_{Turbine}}{P_{Wind}} = \frac{P_{T,mec}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Wind}^3 \cdot A_{Rotor}}$$

Betz

Drallverluste





Kenngrößen

Kenngrößen :	Widerstandsbeiwert	c_W	
	Auftriebsbeiwert	c_A	
	Induzierter Widerstandsbeiwert	c_{W_i}	(bedingt durch Randwirbel)
	Leistungsbeiwert	c_P	
	Drehmomentenbeiwert	c_M	
Winkel :	Aerodynamische Anstellwinkel	α	
	Blattanstellwinkel	β oder ϑ	(konstruktionsbedingt)

Formeln

Formeln :

Auftriebskraft

$$F_A = c_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Widerstandskraft

$$F_W = c_W \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

A ist hier in beiden Fällen die größtmögliche
Projektion des Blattes (Rechteck : $L \cdot T$)

Leistung

$$P = c_P \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Drehmoment

$$M = c_M \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R$$

A entspricht hier der Gesamtrortorkreisfläche

Gleitzahl

$$E = \frac{c_A}{c_W}$$

Brett : E=10, WEC : E=100-150,
Hochleistungsprofil : E=200

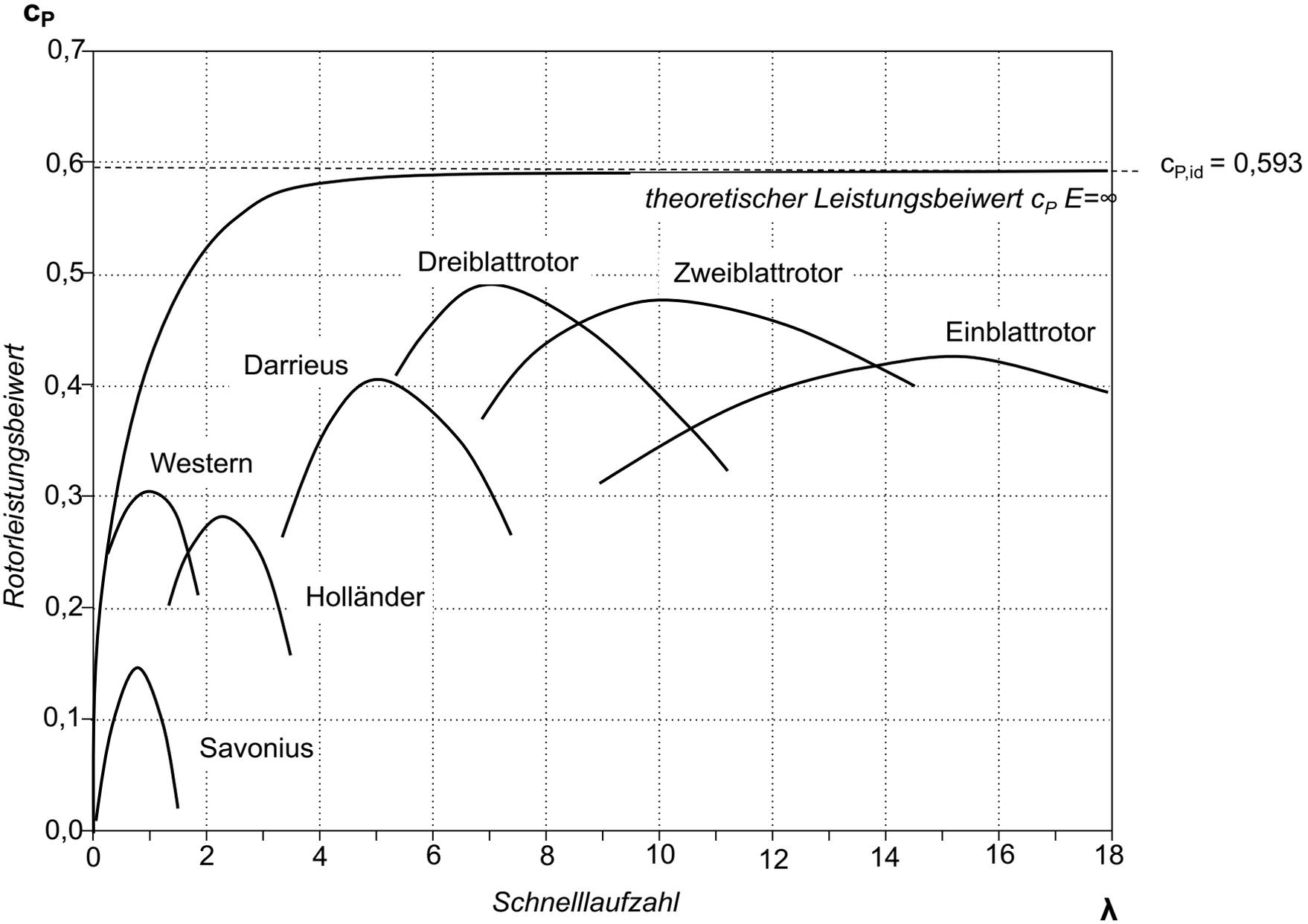
Schnellaufzahl

$$\lambda = \frac{v_{u,sp}}{v_w}$$

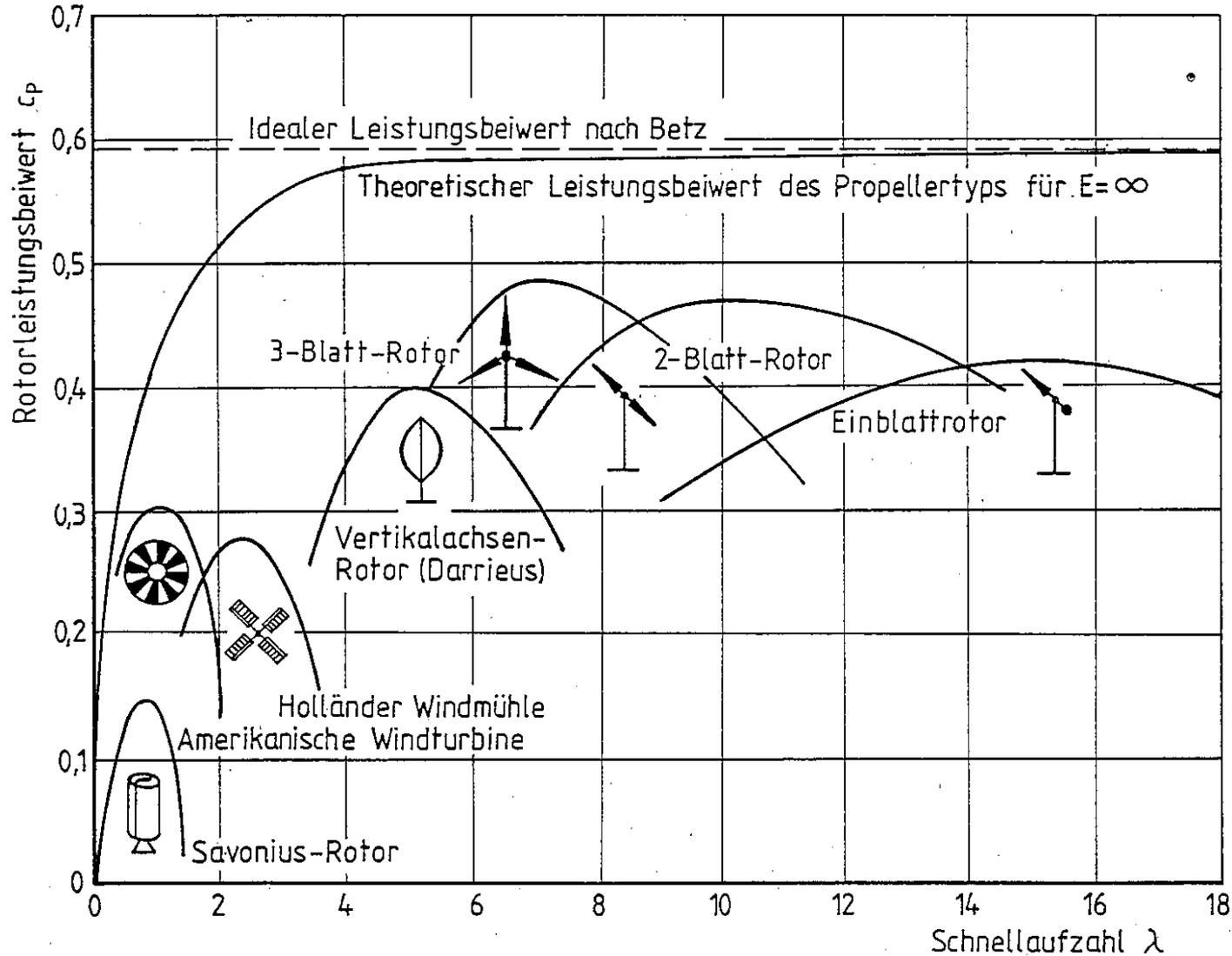
$v_{u,sp}$ = Umfanggeschwindigkeit d. Blattspitze

v_w = Windgeschwindigkeit

$$c_P = \lambda \cdot c_M$$

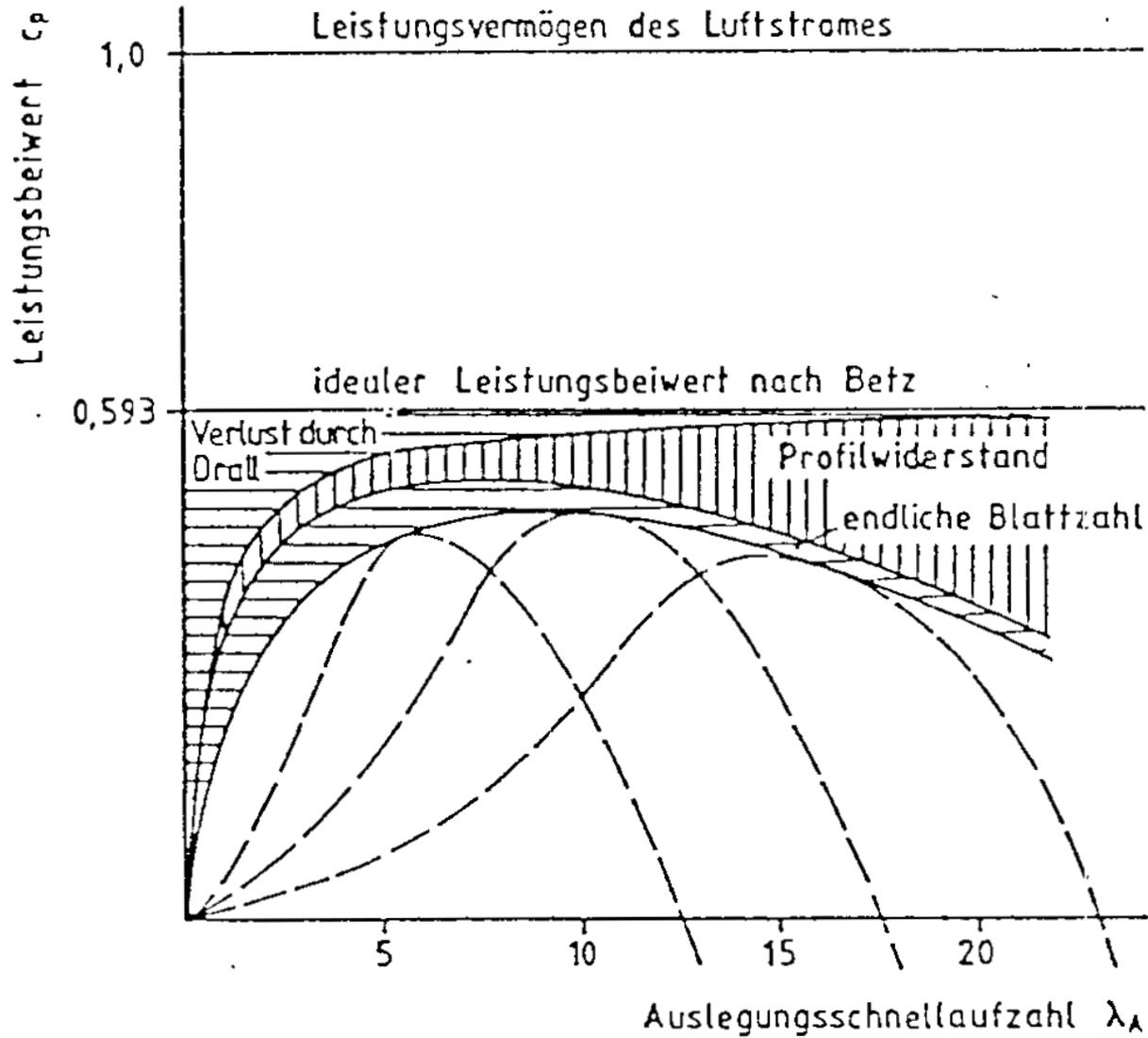


Leistungskennlinien typischer WKA

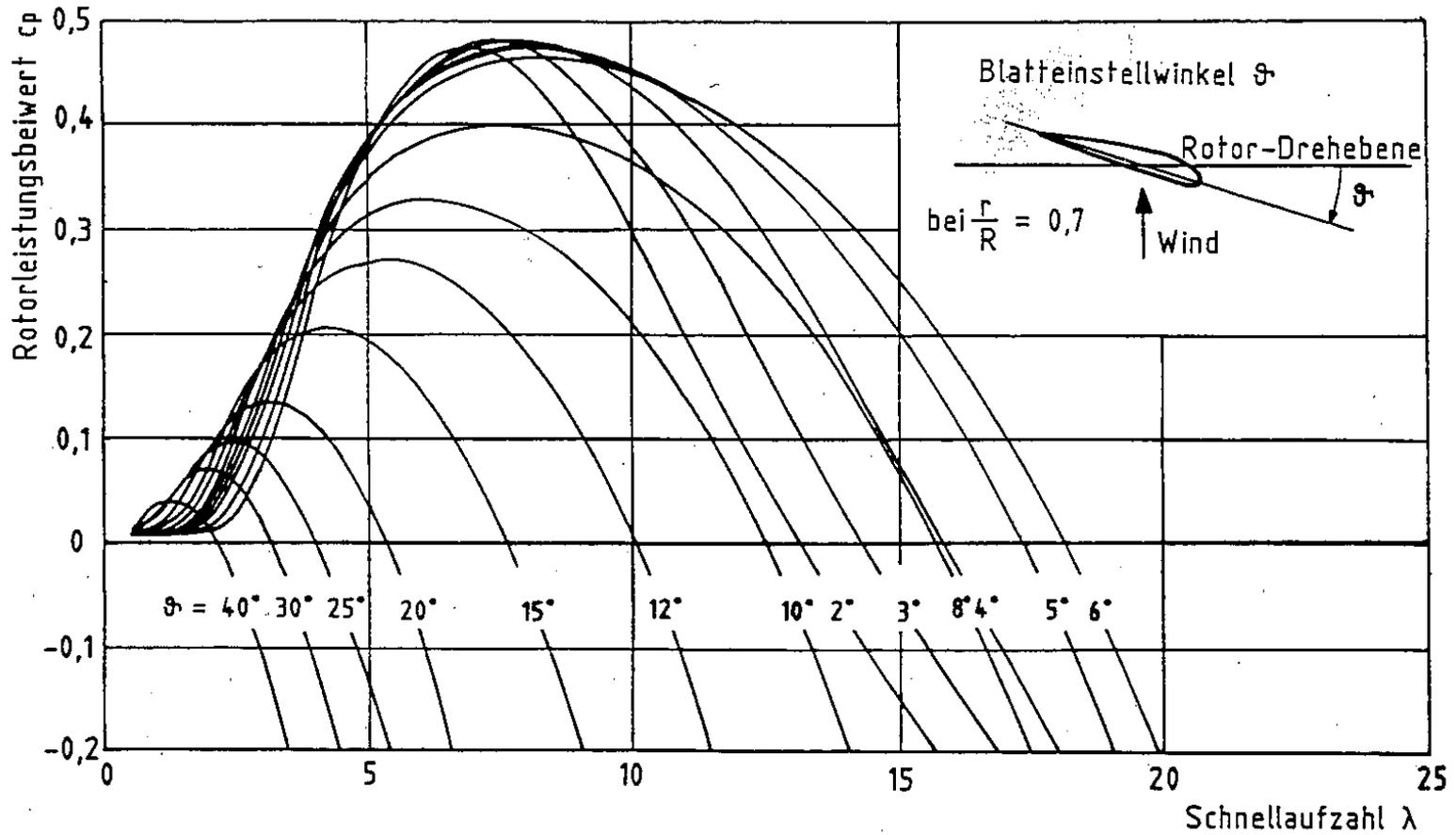


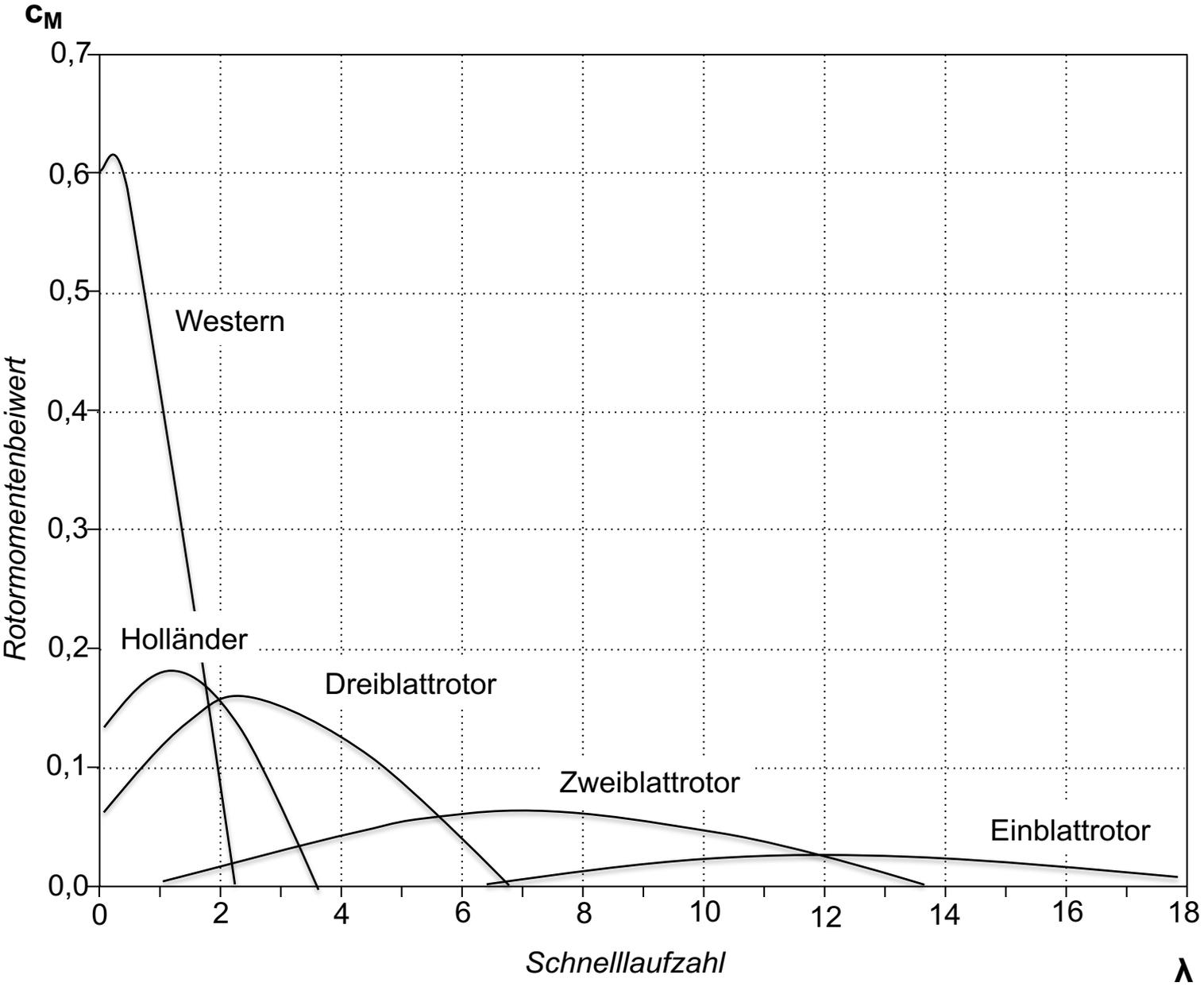
Betz

Verluste

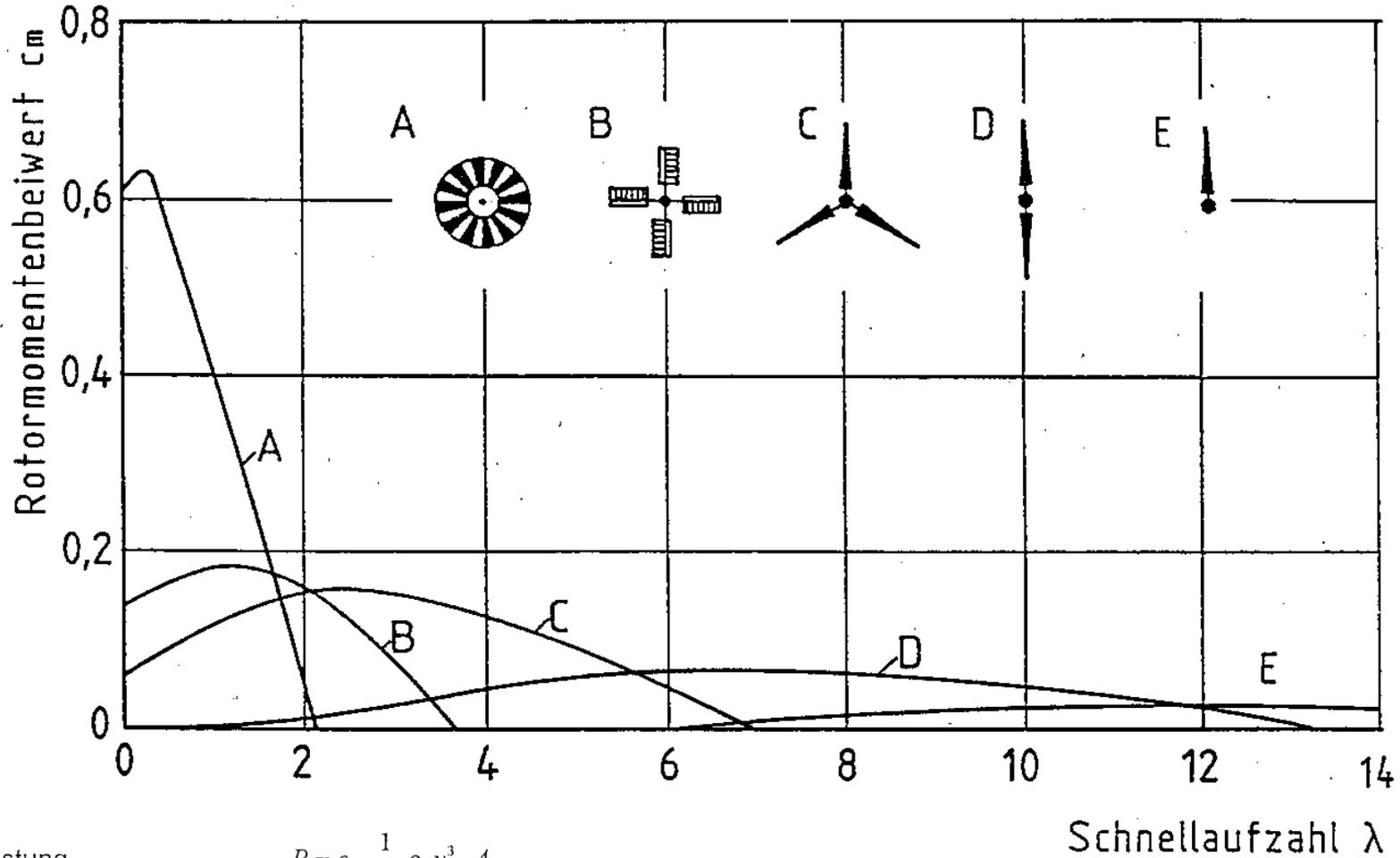


Kennlinienfeld





Momentenfeld typischer WKA



Leistung

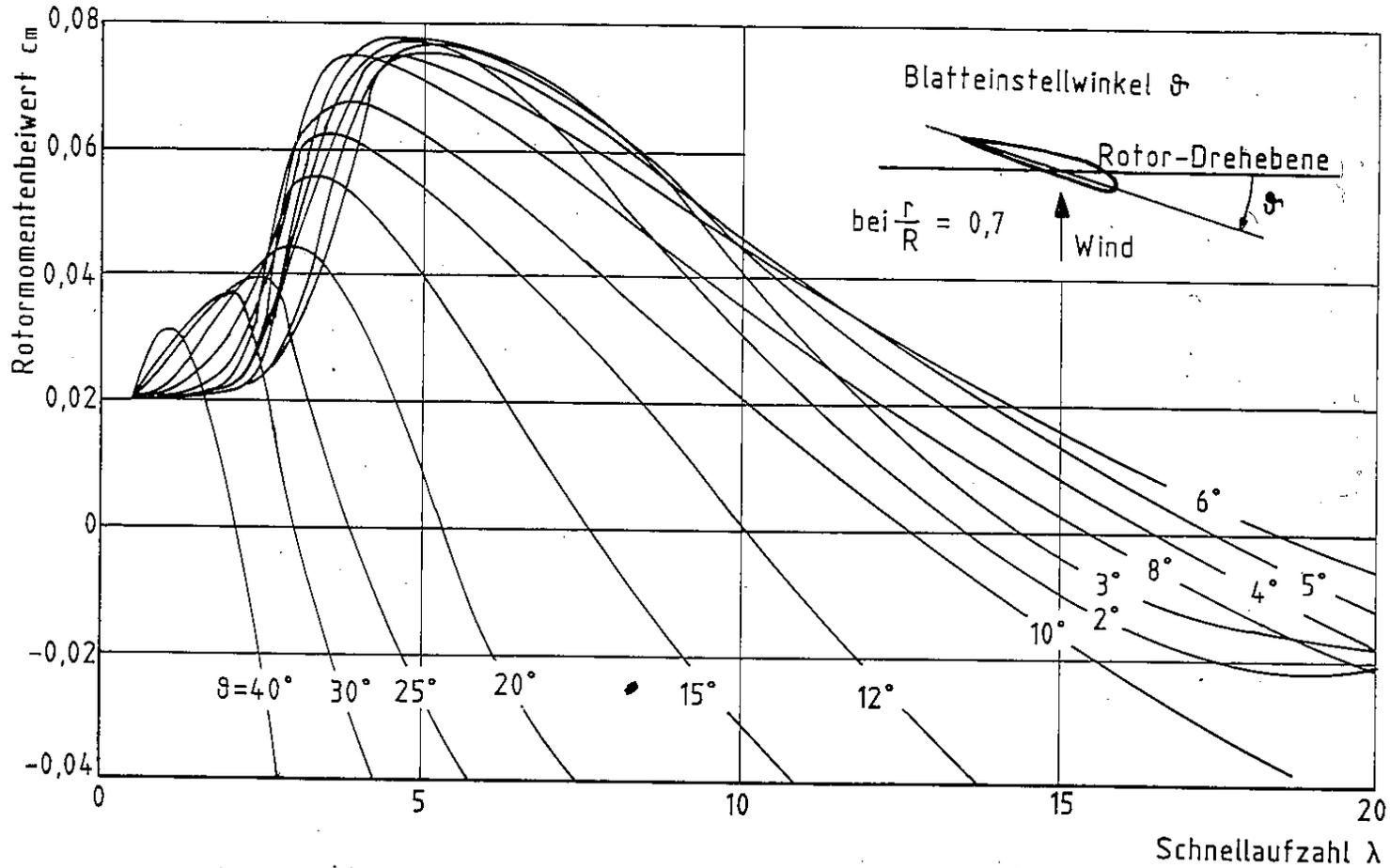
$$P = c_P \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Drehmoment

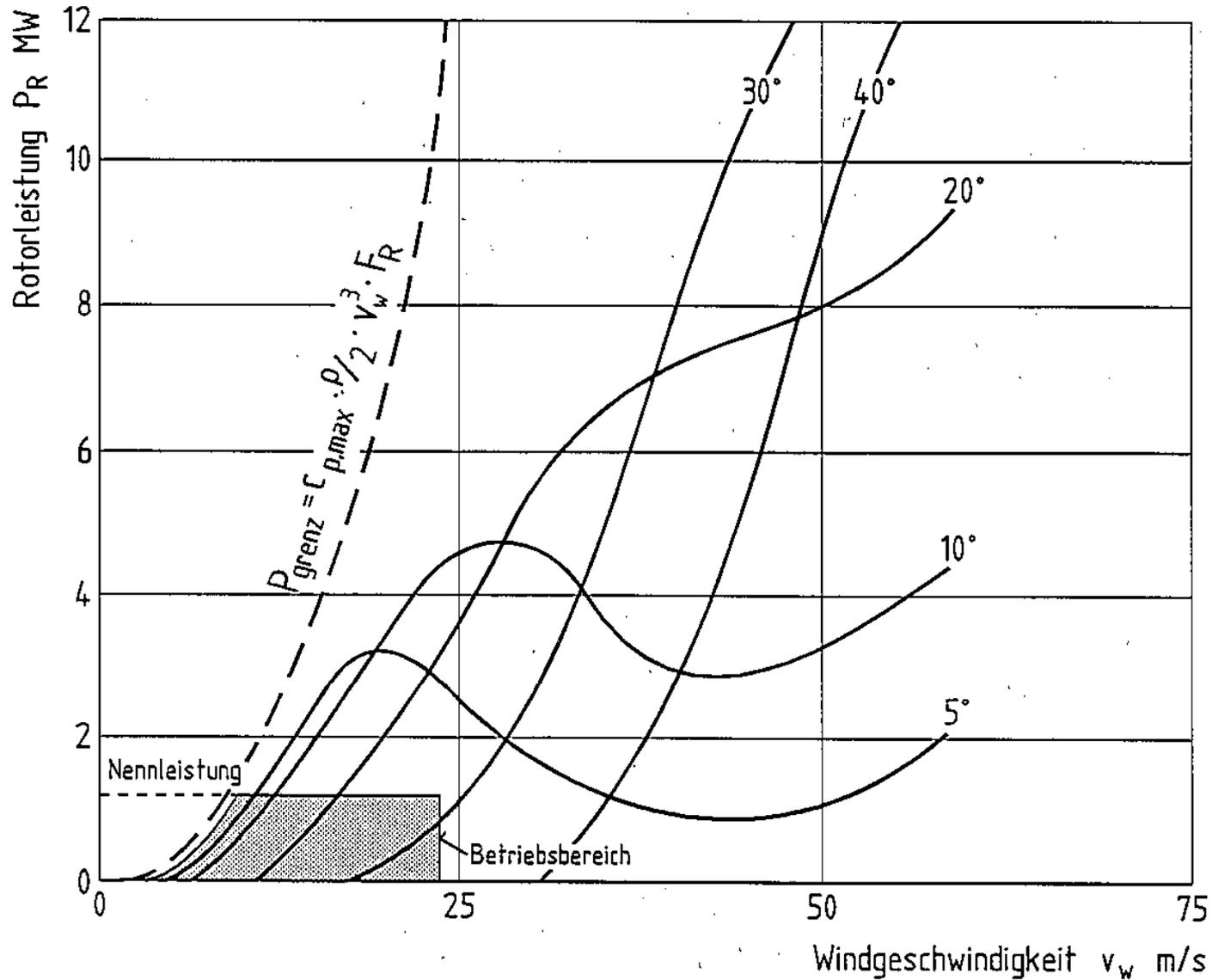
$$M = c_M \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R$$

$$c_P = \lambda \cdot c_M$$

Kennlinienfeld - Momentenbeiwert



Rotorleistungskennlinien

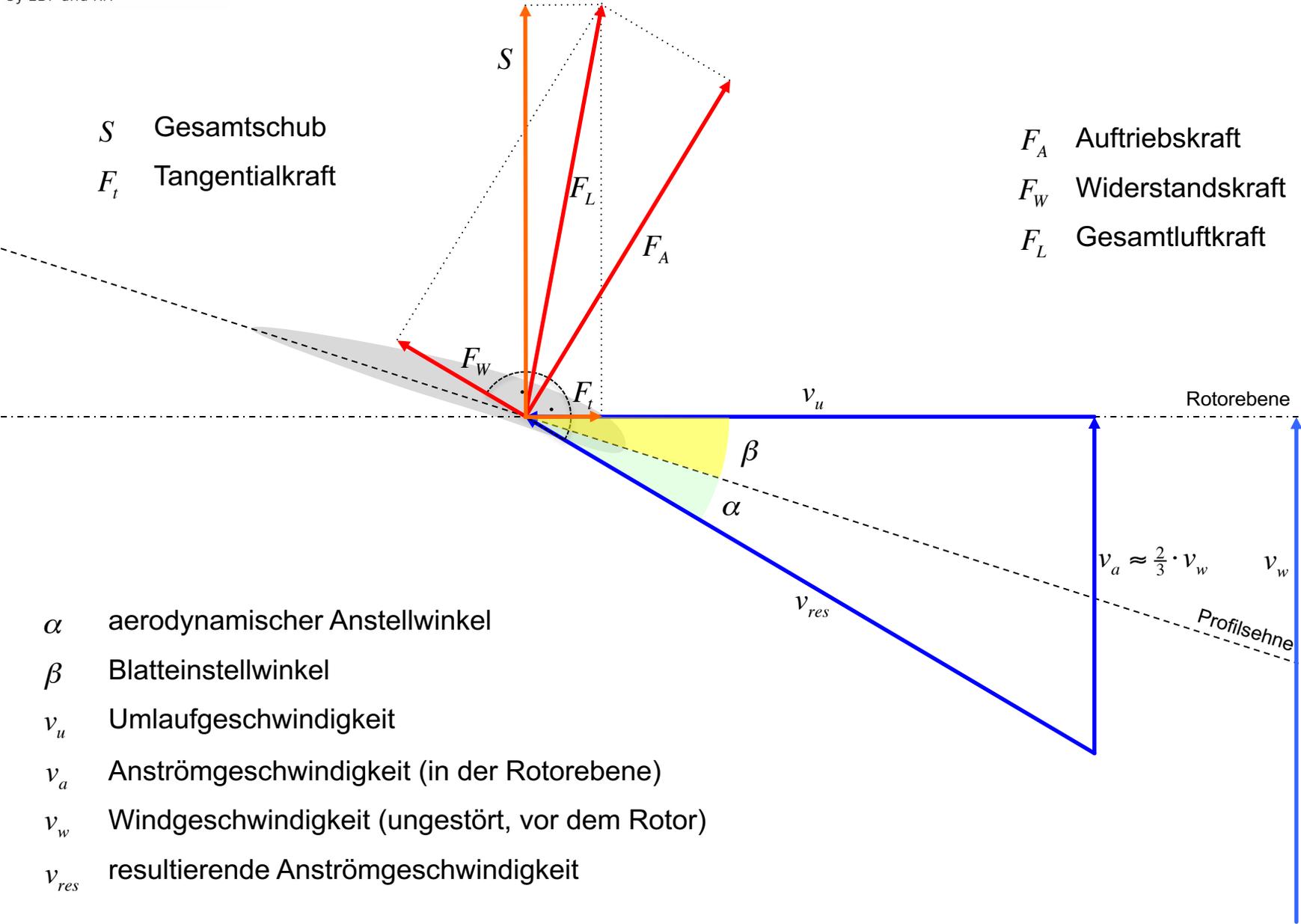


Winddreiecke – Krätedreiecke

Geschwindigkeitsdreiecke

S Gesamtschub
 F_t Tangentialkraft

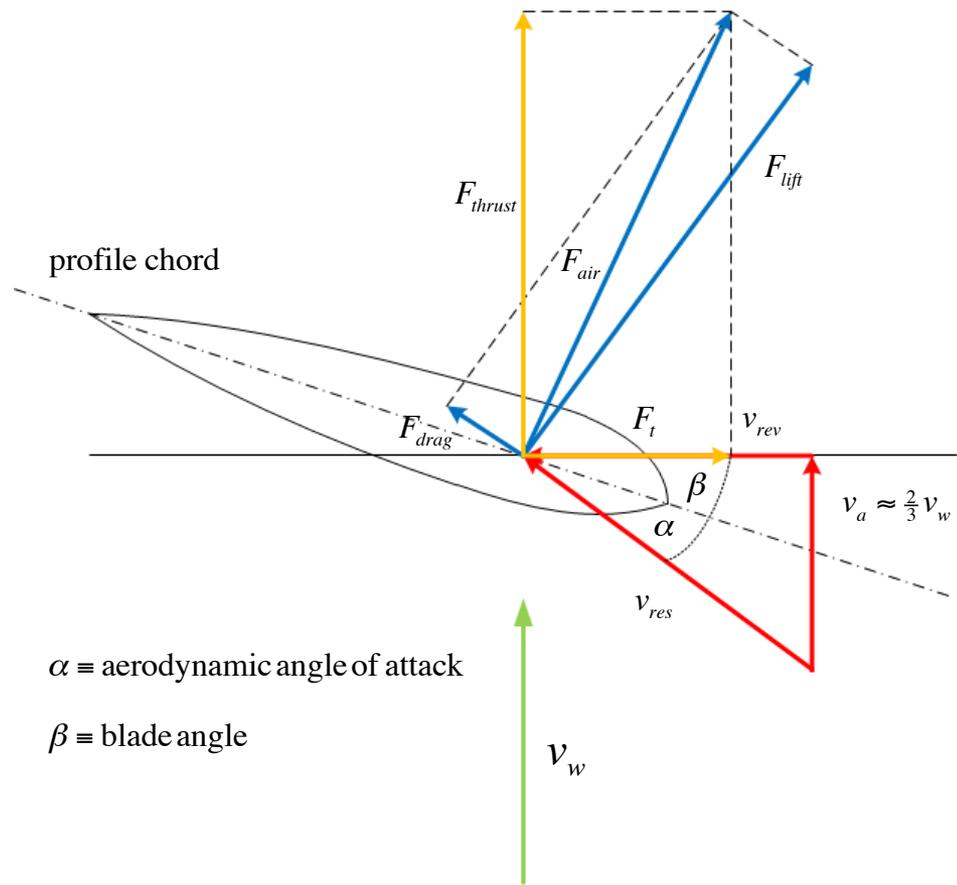
F_A Auftriebskraft
 F_W Widerstandskraft
 F_L Gesamtluftkraft



α aerodynamischer Anstellwinkel
 β Blatteinstellwinkel
 v_u Umlaufgeschwindigkeit
 v_a Anströmgeschwindigkeit (in der Rotorebene)
 v_w Windgeschwindigkeit (ungestört, vor dem Rotor)
 v_{res} resultierende Anströmgeschwindigkeit

Winddreiecke – Kräfte dreiecke

Geschwindigkeitsdreiecke



$\alpha \equiv$ aerodynamic angle of attack

$\beta \equiv$ blade angle

Wind Triangle / Force Triangle