



EIFER

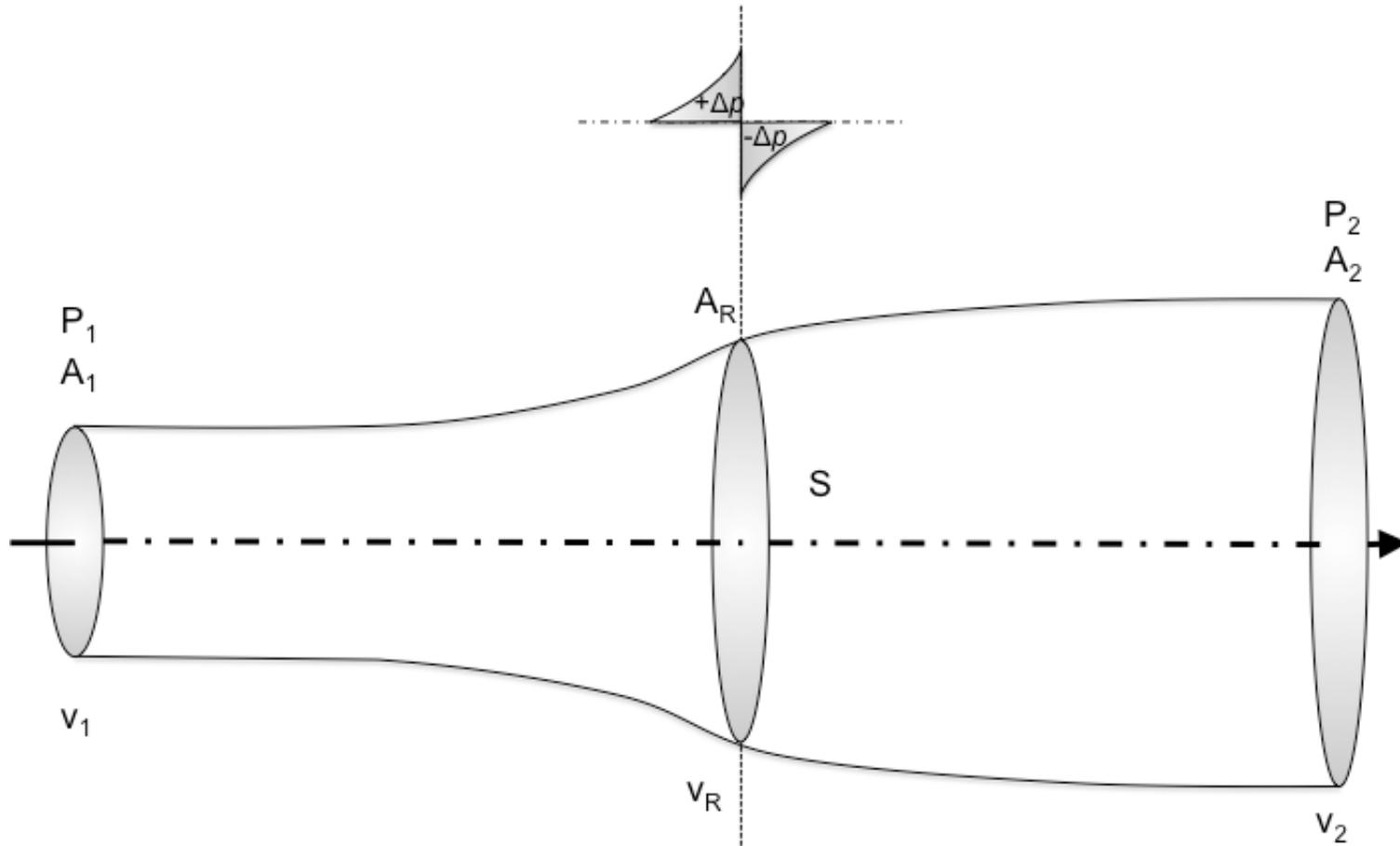
EUROPÄISCHES INSTITUT FÜR ENERGIEFORSCHUNG  
INSTITUT EUROPEEN DE RECHERCHE SUR L'ENERGIE  
EUROPEAN INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH

# Aerodynamik Leistungsregelung - Nachführung

KIT



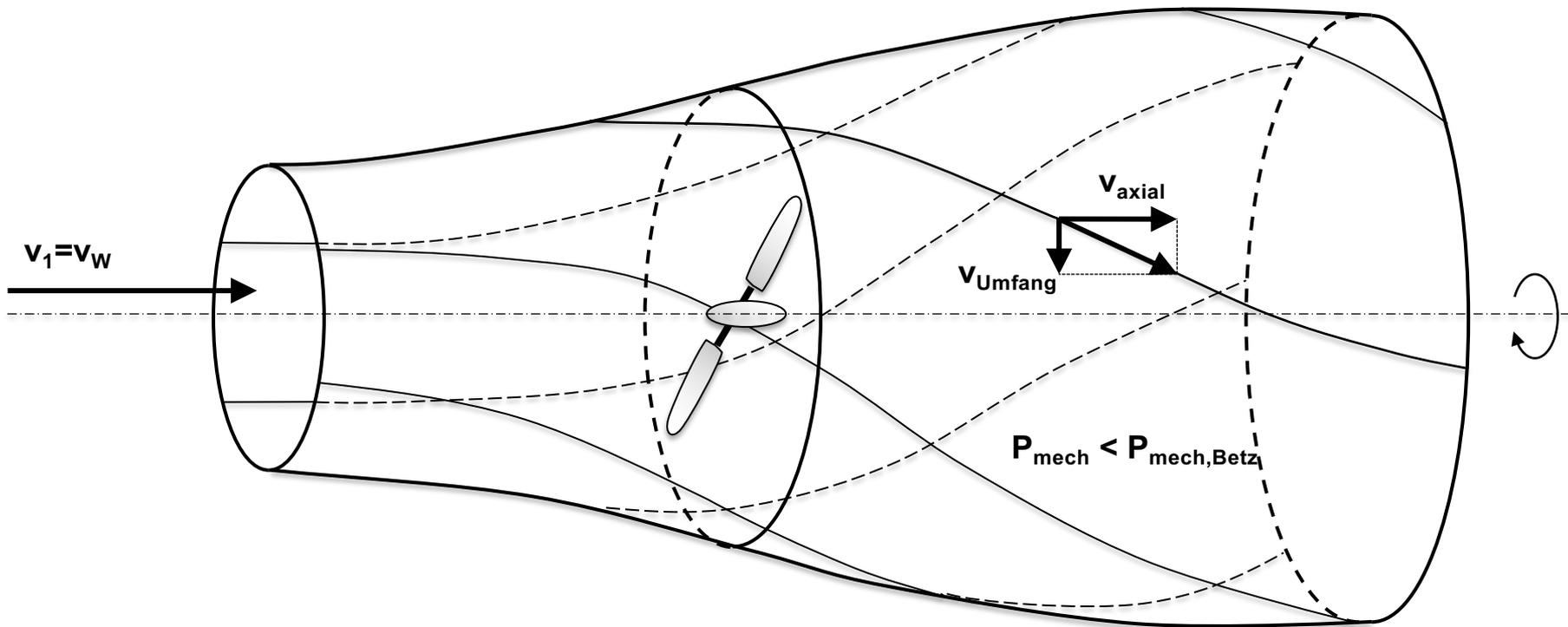
- Rekapitulation Betz
- Leistungskennlinie
- Leistungsregelung
- Windrichtungsnachführung
- Aerodynamischer Zusammenhänge



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

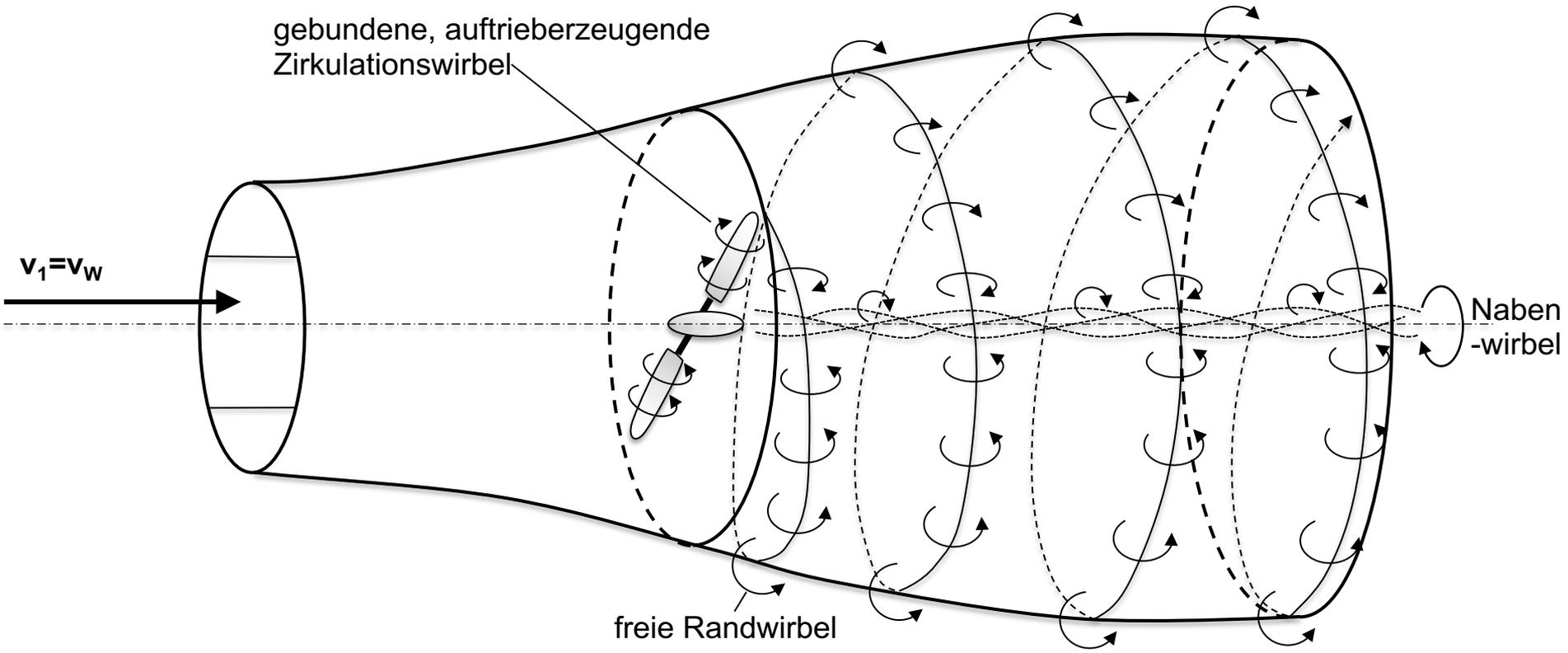
# Betz

## Drallverluste



# Betz

## Wirbelverluste



# 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	$\alpha$	
	Blattanstellwinkel	$\beta$ oder $\vartheta$	(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

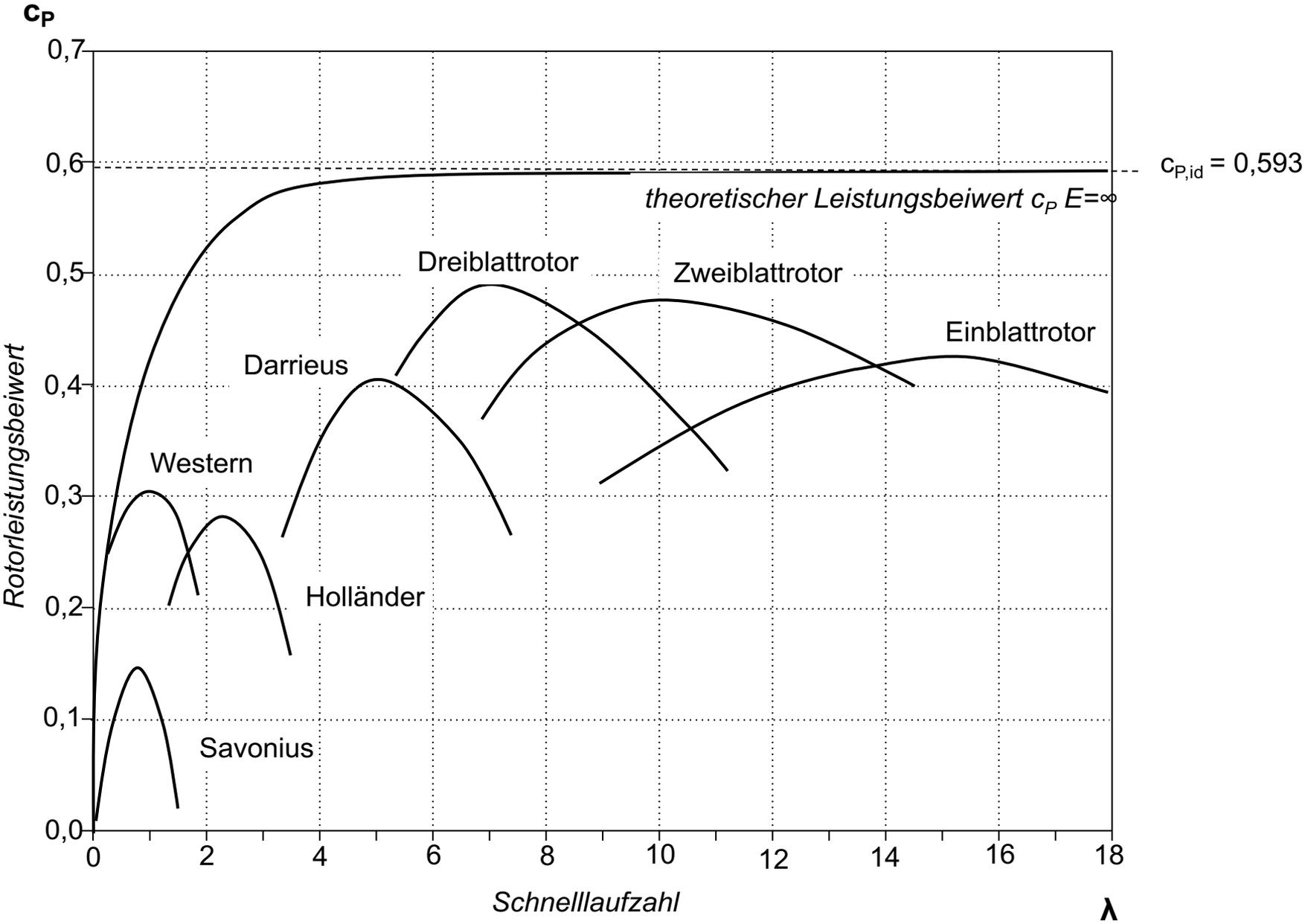
Schnellaufzahl

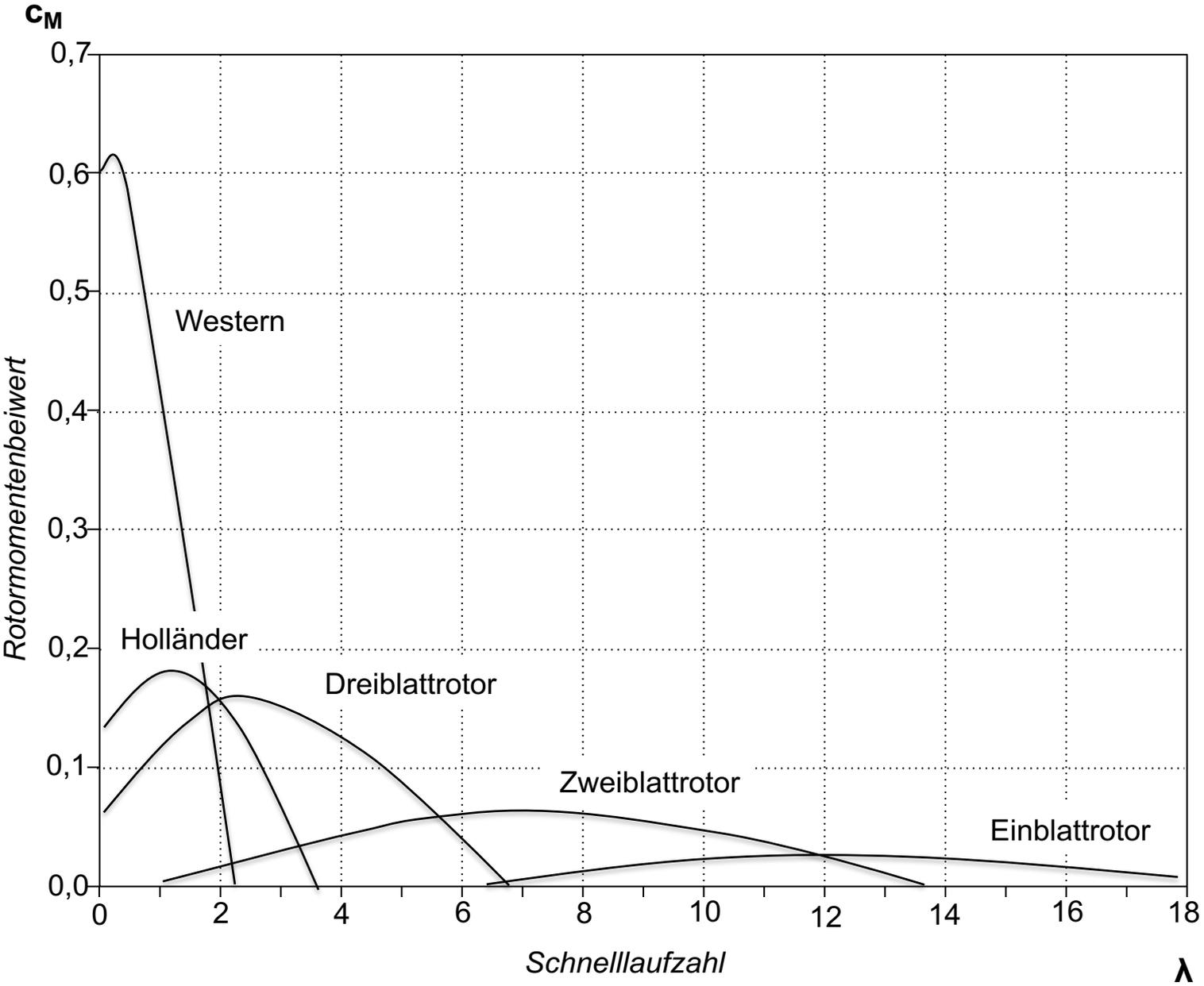
$$\lambda = \frac{v_{u,sp}}{v_w}$$

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

$v_w$  = Windgeschwindigkeit

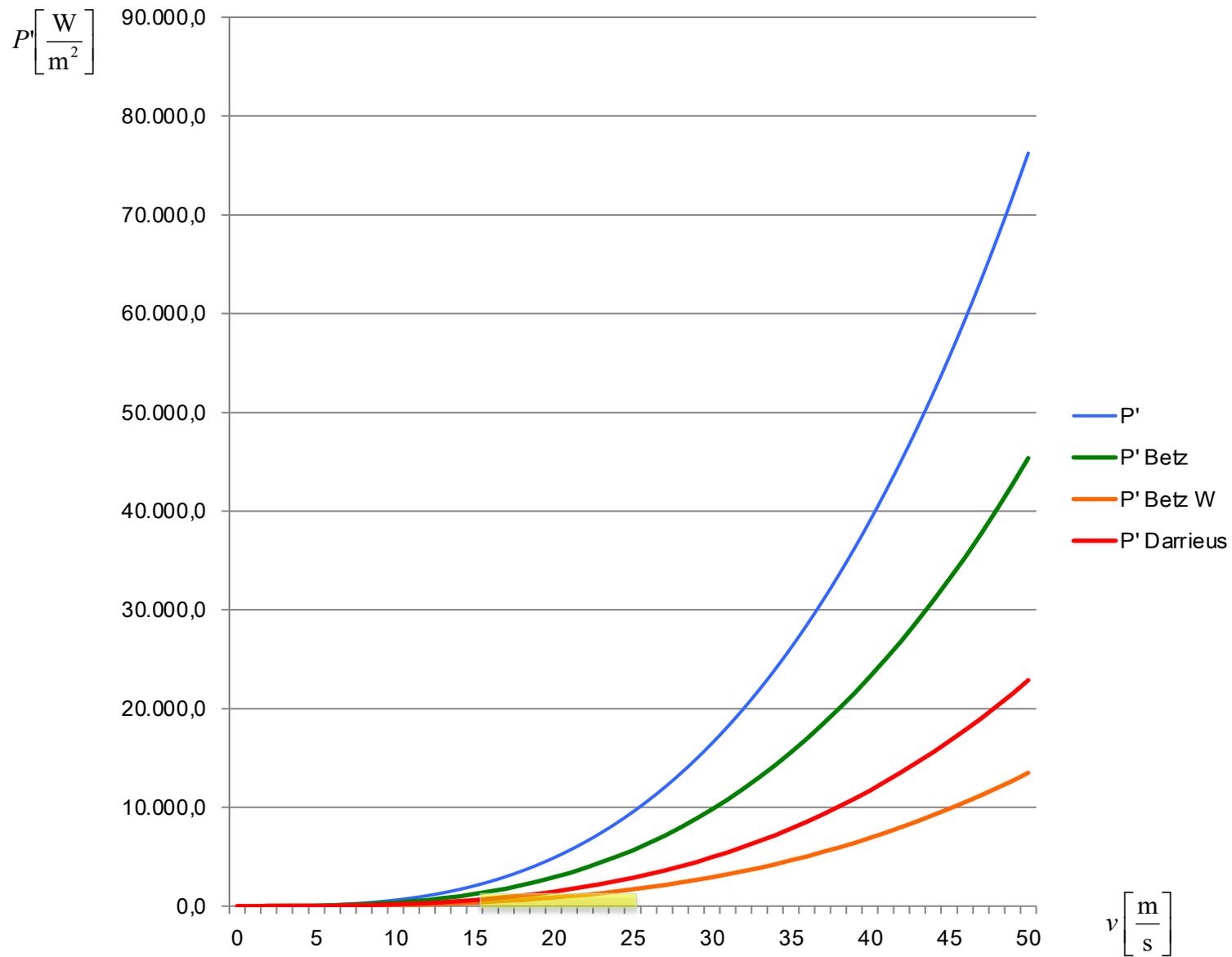
$$c_P = \lambda \cdot c_M$$



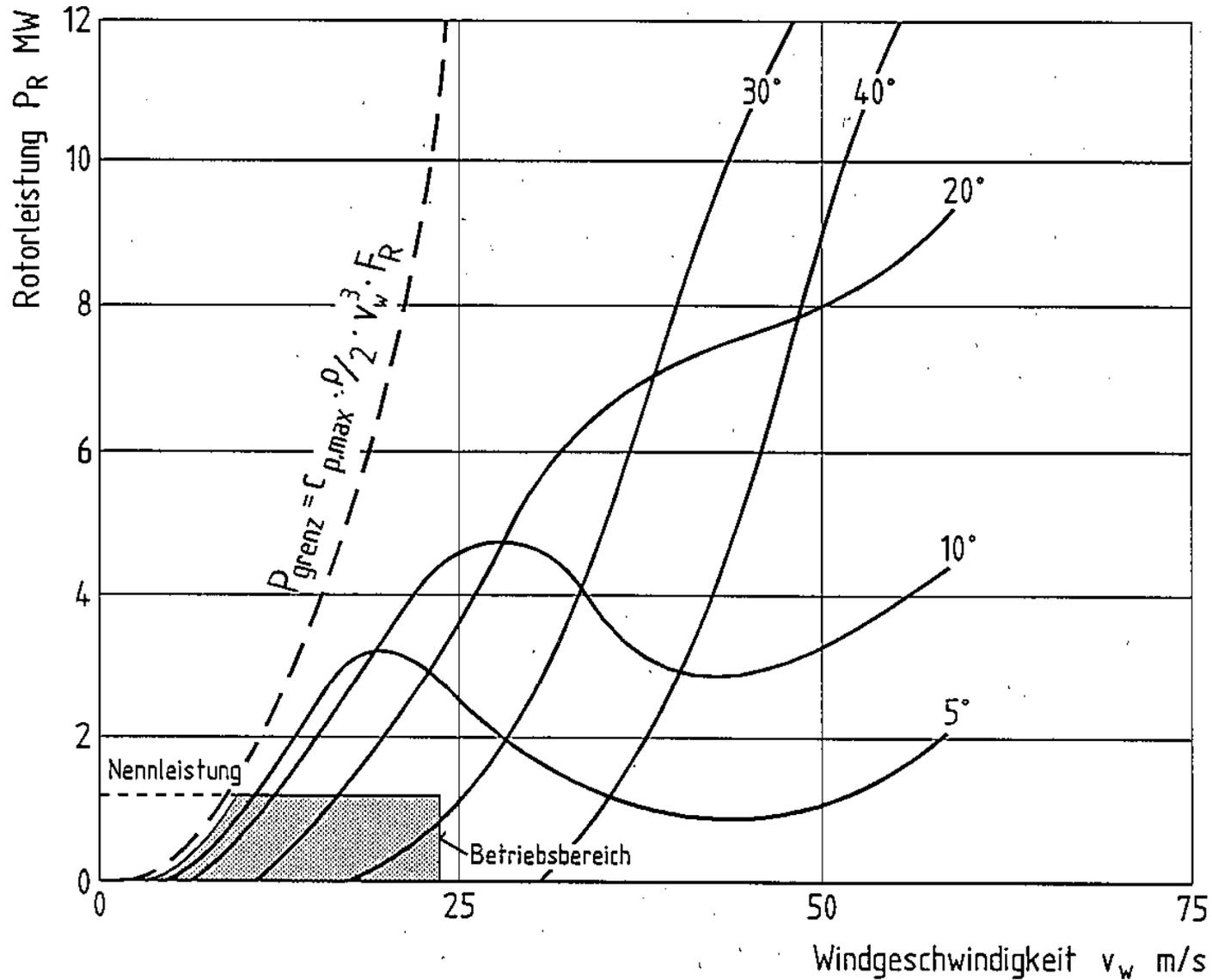


# Spezifische Leistung

## Reale Nutzung



# Rotorleistungskennlinien

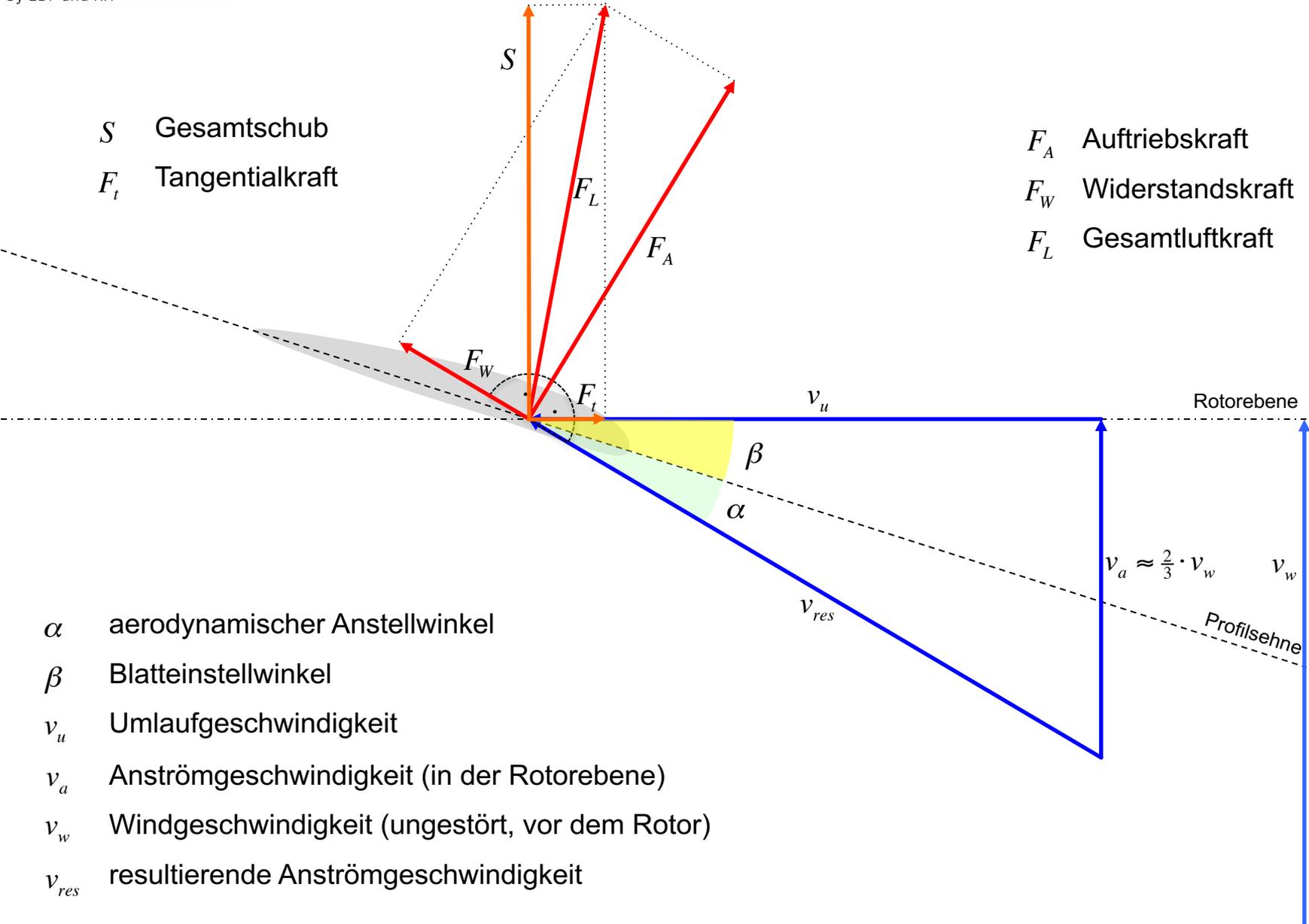


# Winddreiecke – Krätedreiecke

## Geschwindigkeitsdreiecke

$S$  Gesamtschub  
 $F_t$  Tangentialkraft

$F_A$  Auftriebskraft  
 $F_W$  Widerstandskraft  
 $F_L$  Gesamtluftkraft

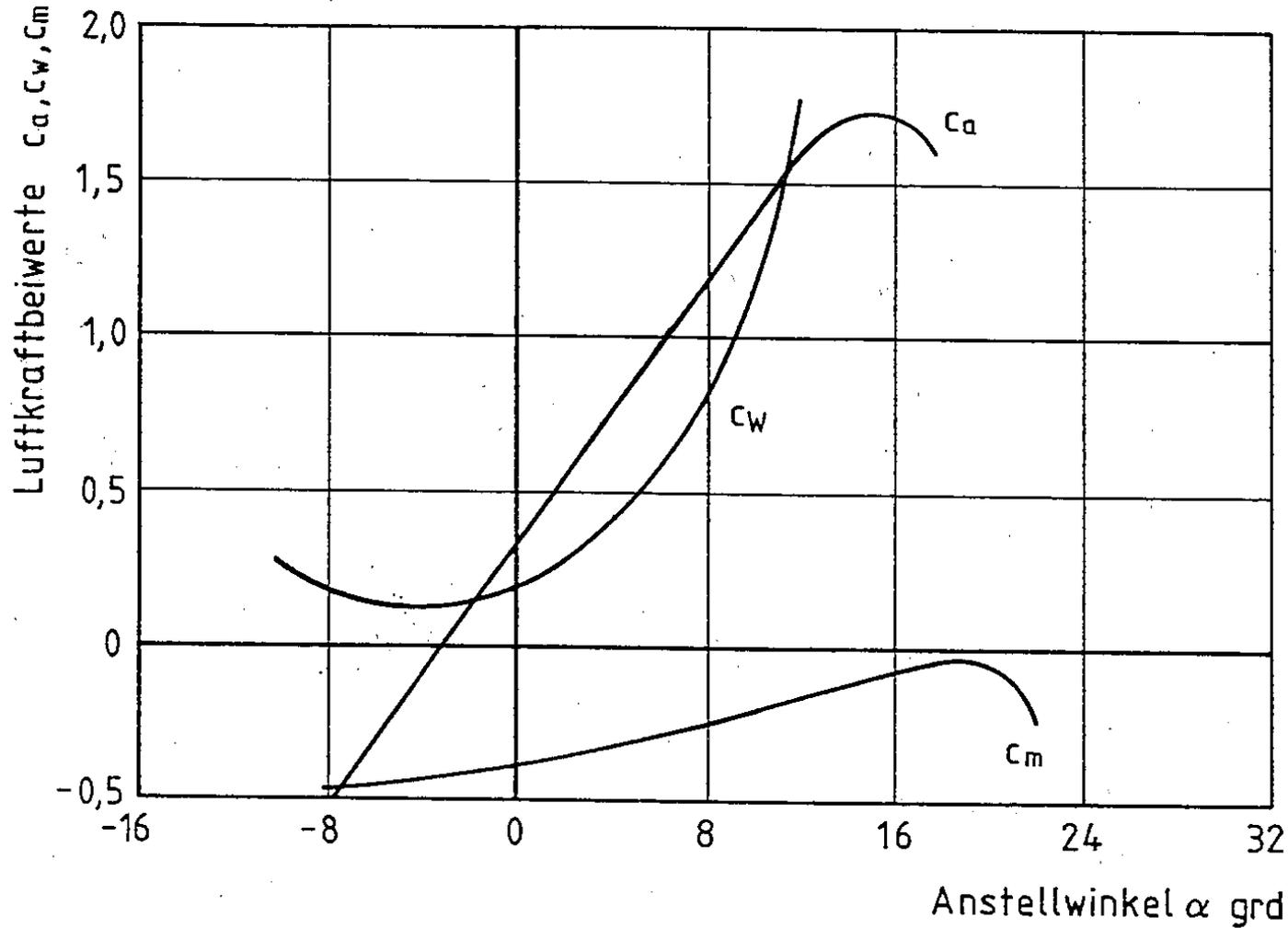


$\alpha$  aerodynamischer Anstellwinkel  
 $\beta$  Blatteinstellwinkel  
 $v_u$  Umlaufgeschwindigkeit  
 $v_a$  Anströmgeschwindigkeit (in der Rotorebene)  
 $v_w$  Windgeschwindigkeit (ungestört, vor dem Rotor)  
 $v_{res}$  resultierende Anströmgeschwindigkeit

- Pitch (aktiv)
  - Aktive Reduzierung von  $\alpha$
- Stall (aktiv)
  - Aktive Vergrößerung von  $\alpha$  bis Strömungsabriss durch  $\alpha$  (kritisch)
- Stall (passiv)
  - Strömungsabriss durch  $\alpha$  (kritisch)
- Aus dem Wind drehen
  - Schräganströmung

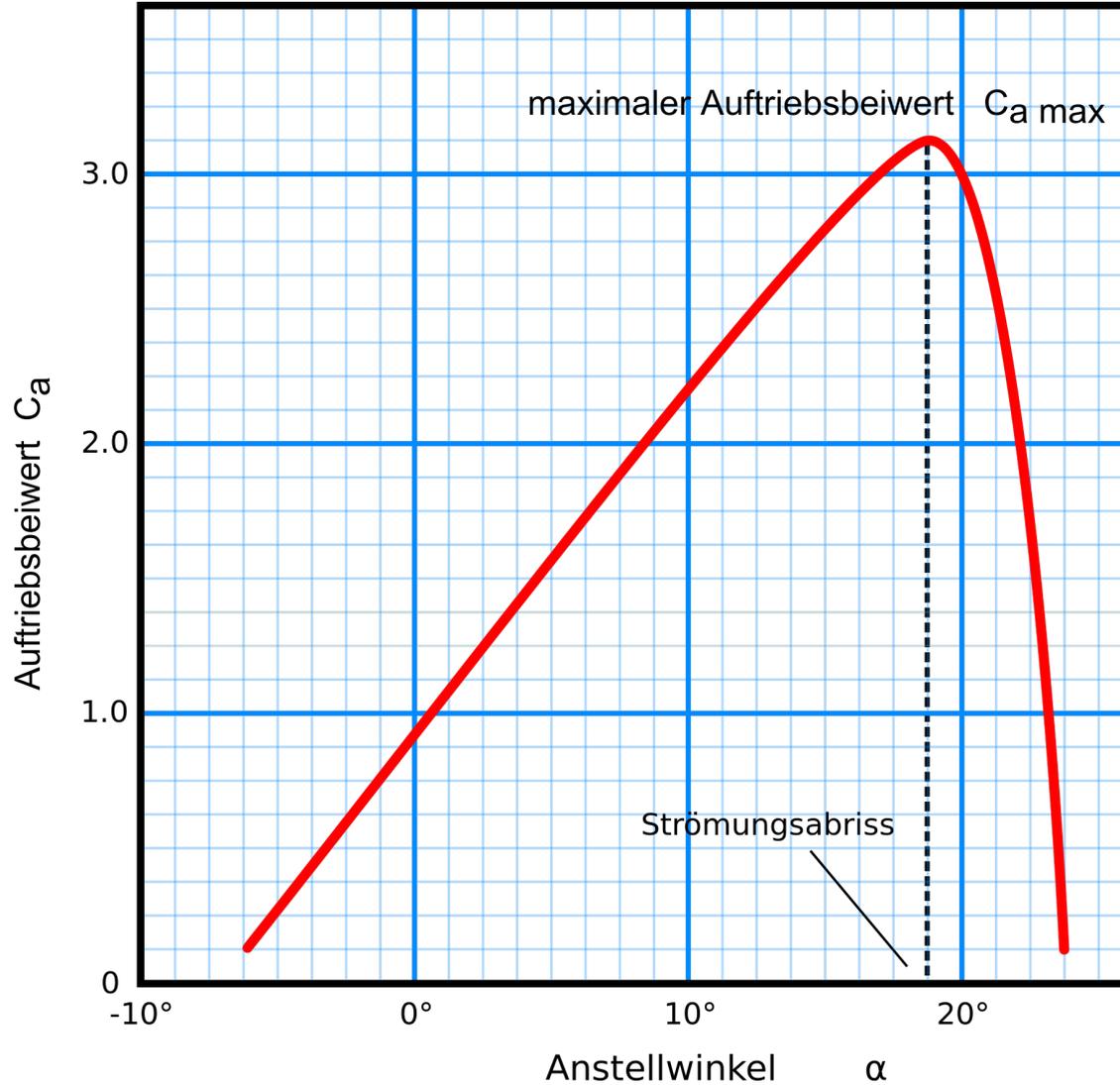
# Leistungsregelung

## Lilienthalsche Polare – aufgelöstes Polardiagramm

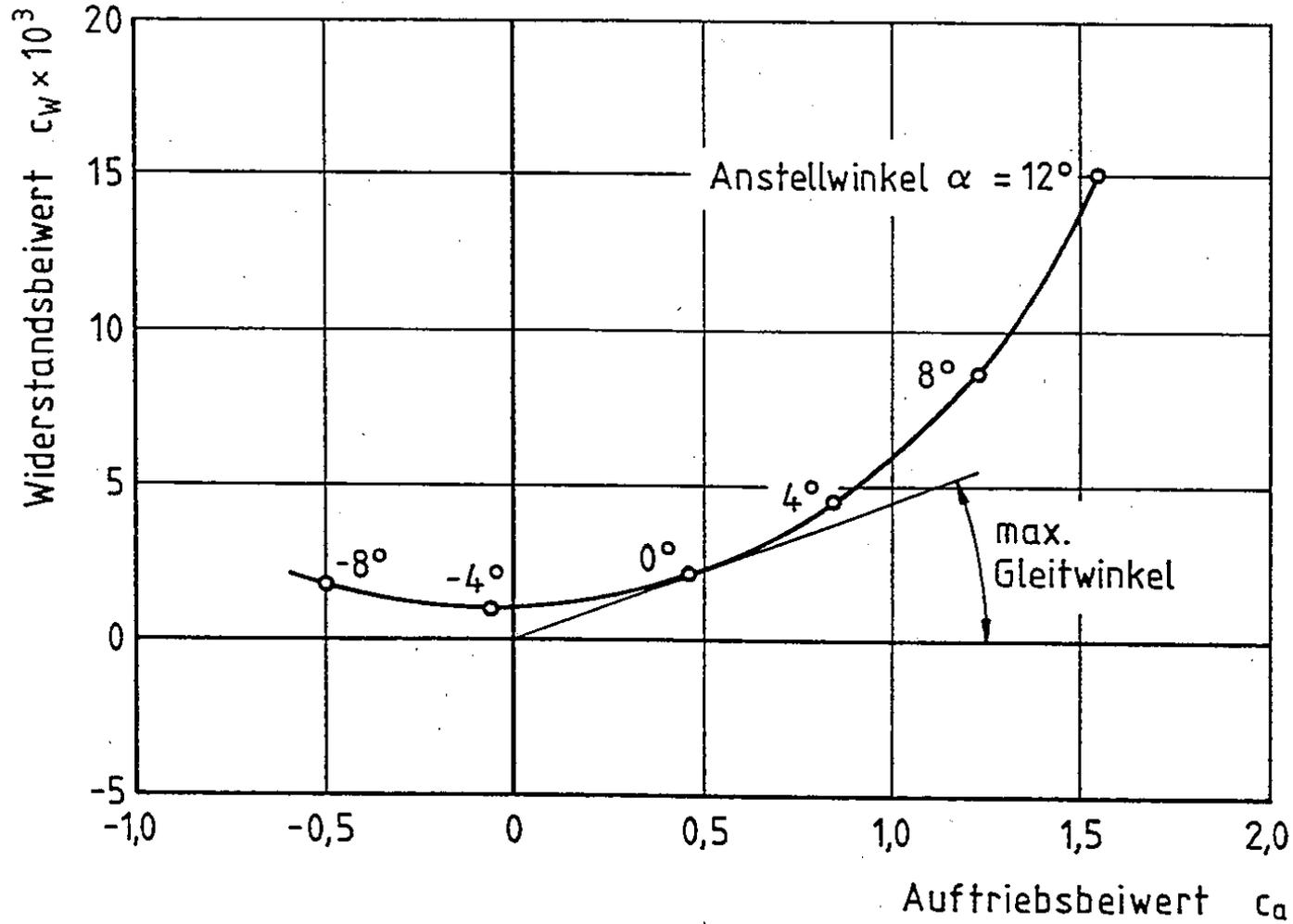


# Leistungsregelung

## Lilienthalsche Polare – aufgelöstes Polardiagramm

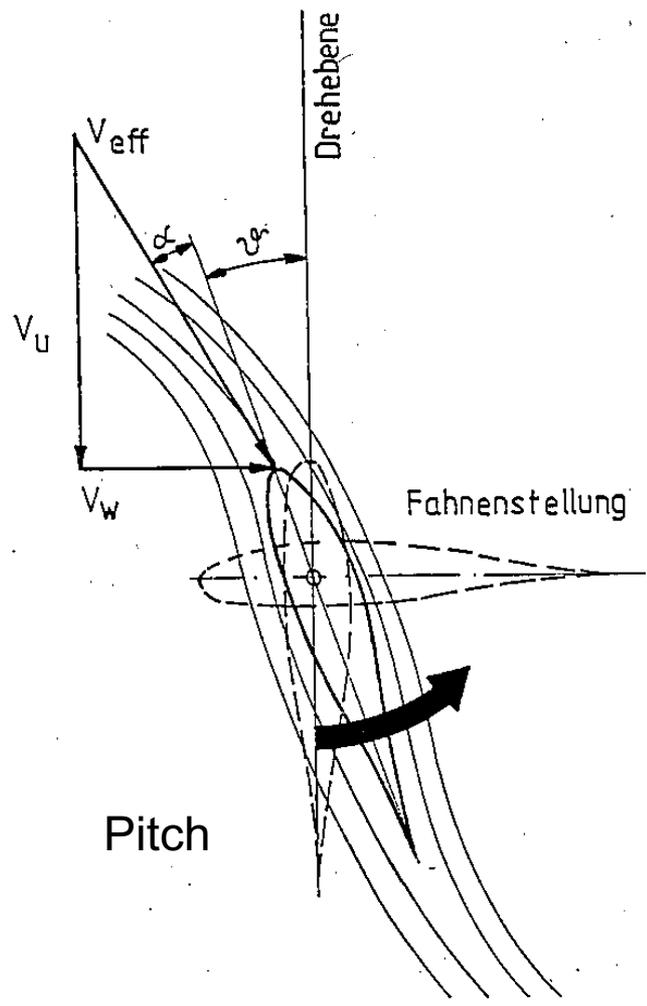
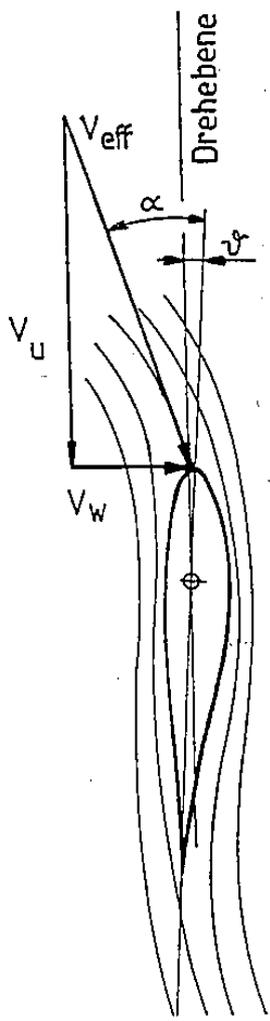


# Leistungsregelung amerikanische Polare

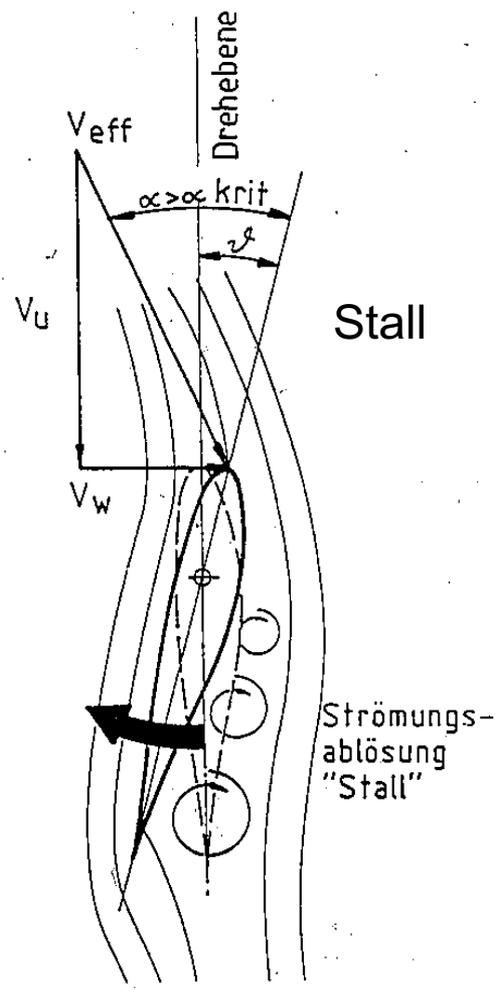


# Leistungsregelung

## Pitch – Stall aktiv



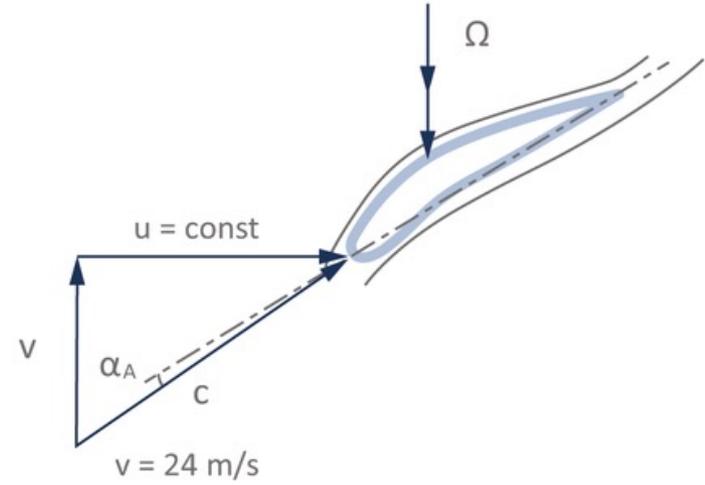
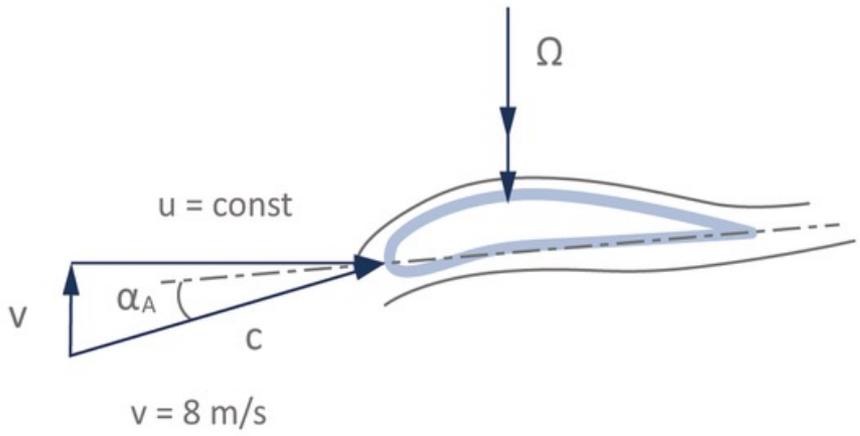
Pitch



Stall

Strömungsablösung  
"Stall"

# Leistungsregelung Pitch



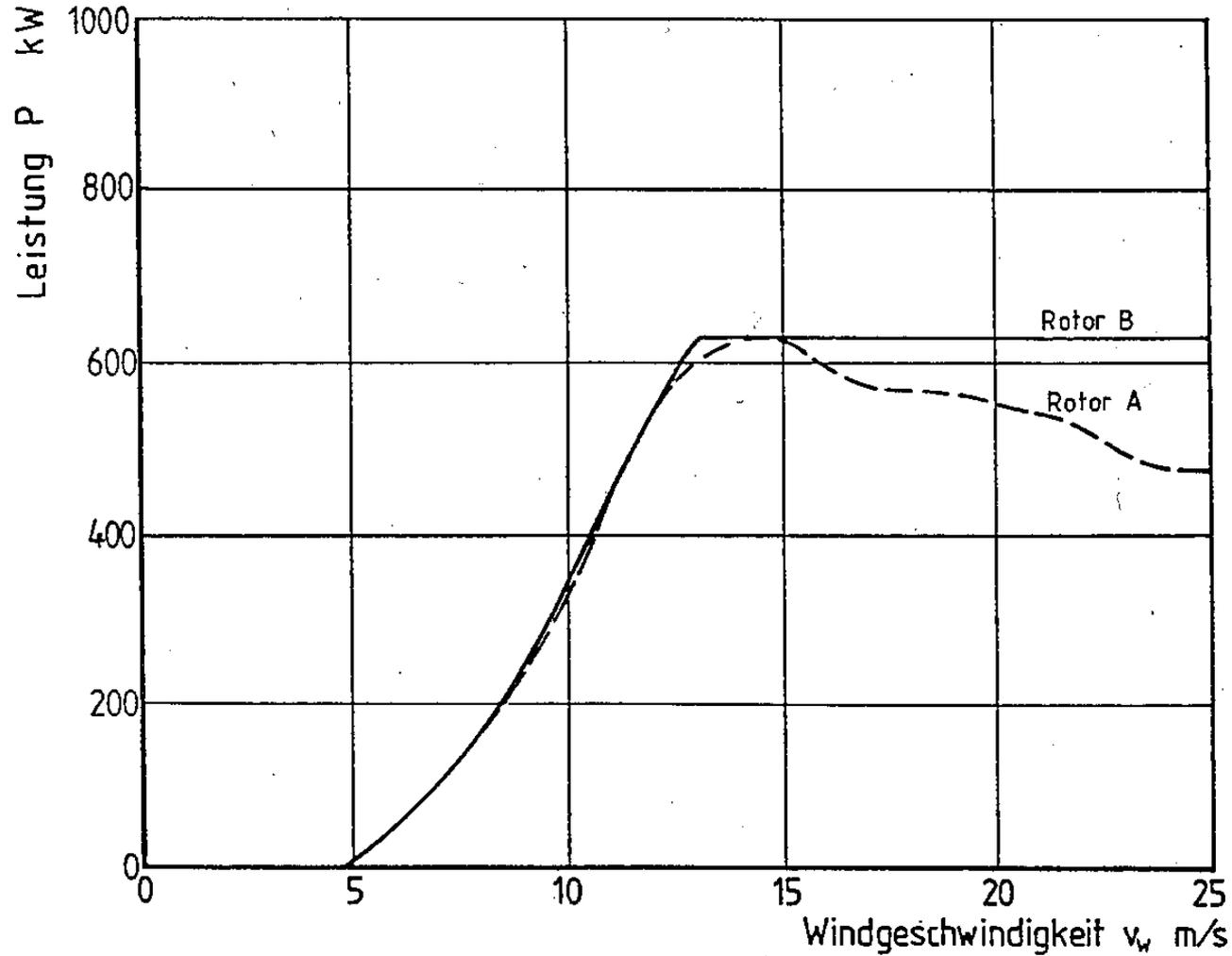
Mit diesem Prinzip wird die Leistung durch die Verdrehung der Blätter (Regelung des Anstellwinkels) an die Windgeschwindigkeit angepasst:

- Bei sehr schwachem Wind (unter 3-4 m/s) produziert die Windenergieanlage keinen elektrischen Strom: Der Wind ist zu schwach um die Rotorwelle anzutreiben. Die Blätter sind in so genannter Fahnenstellung (Pitchwinkel  $\approx 90^\circ$ ) gedreht. Die Windenergieanlage steht still oder dreht sehr langsam, was Trudelbetrieb genannt wird.
- Bei normalem Wind (3-4 bis 10-15 m/s) dreht die Windenergieanlage und produziert Leistung, aber der Wind ist noch zu schwach, um die Nennleistung der Anlage zu erreichen. Der Pitchwinkel ist  $0^\circ$ , die Rotorblätter stehen im optimalen Arbeitspunkt. Von der Windleistung wird so viel wie möglich in mechanische Energie umgewandelt.
- Bei Starkwind (10-15 bis 25 m/s) ist die angebotene Windleistung zu groß und die Anlage muss in ihrer Leistungsabgabe begrenzt werden. Die Anlage wird dann „gepitch“. Der Pitchwinkel nimmt mit der Windgeschwindigkeit zu (von  $0^\circ$  bis circa  $30^\circ$ ) und die Auftriebskraft wird so beeinflusst, dass die Leistungsabgabe der Windenergieanlage konstant bei Nennleistung bleibt.
- Bei Sturm (ab 25 m/s) ist der Wind so stark, dass die Windenergieanlage abgeschaltet werden muss, um eventuelle Schäden zu vermeiden. Der Pitchwinkel ist nahezu  $90^\circ$ ; die Blätter sind in Fahnenstellung.

Die Verdrehung der Blätter wird durch das Pitch-System realisiert. Da es für jedes Rotorblatt als selbständiges und unabhängiges System ausgeführt ist, können sie als drei Primärbremsen angesehen werden. Für das sichere Herunterfahren der Anlage aus allen Zuständen reicht das Verstellen von nur einem Rotorblatt, das in die Fahnenposition (Position in Richtung des Windes) gebracht wird.

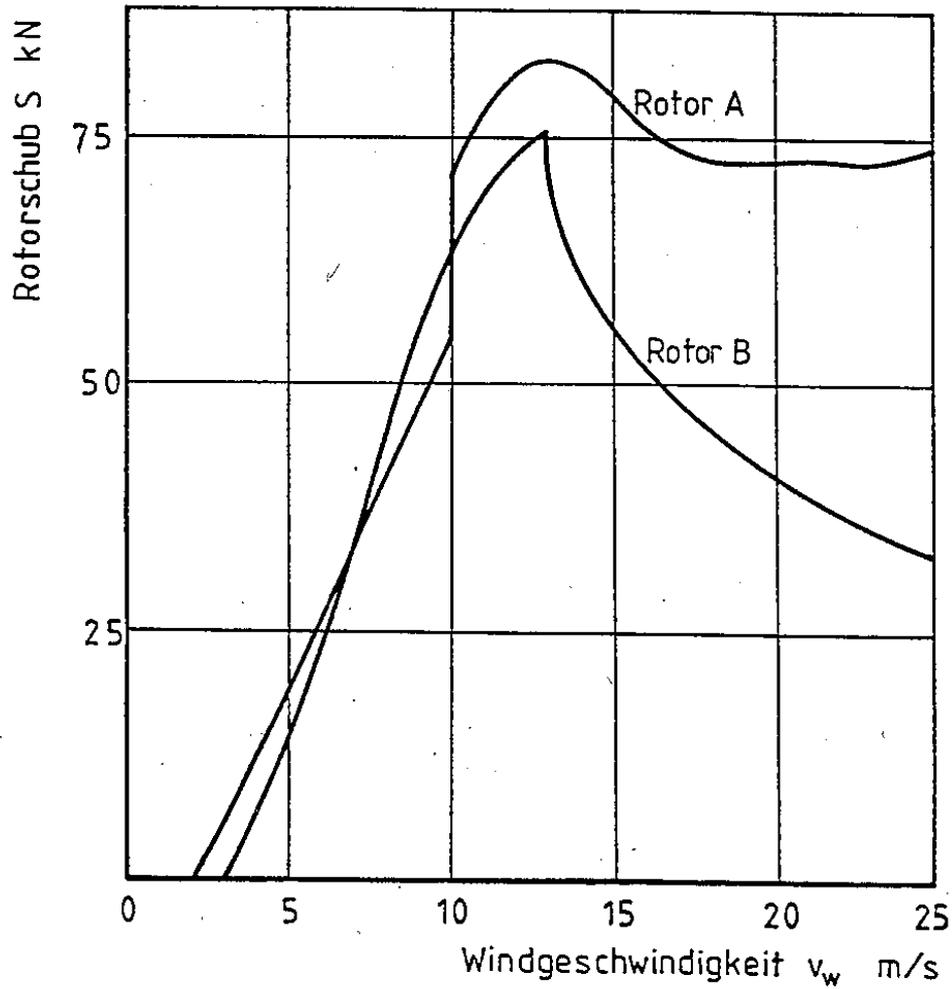
# Leistungsregelung

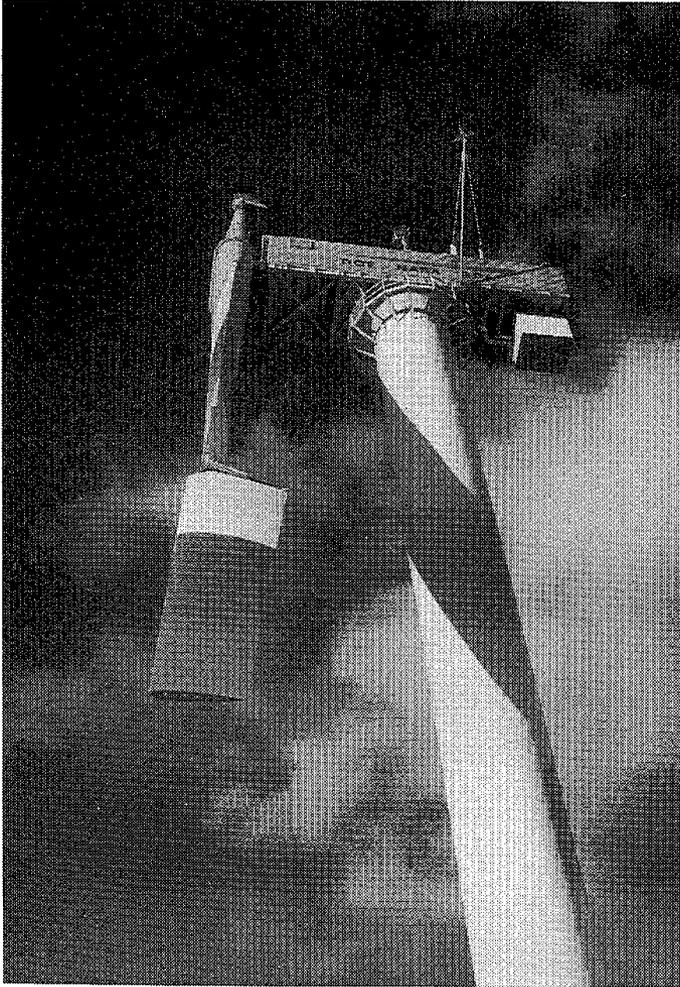
## Leistungsaufnahme



# Leistungsregelung

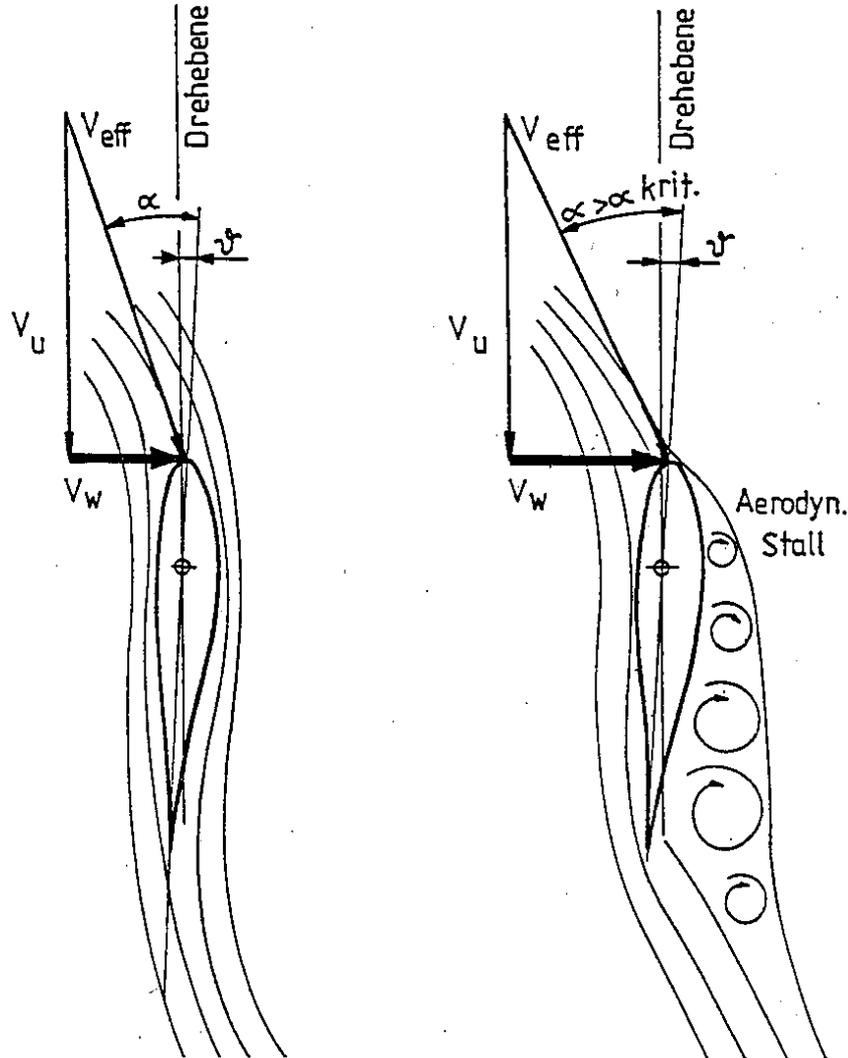
## Rotorschub





# Leistungsregelung

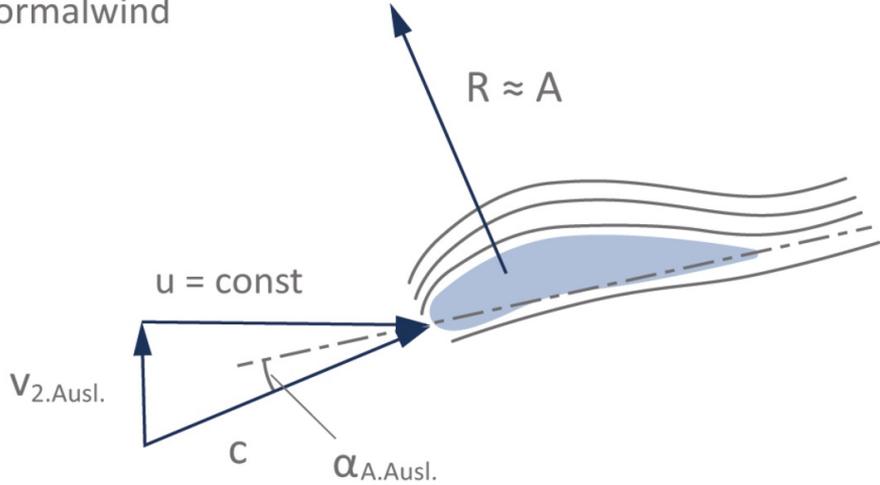
## Stall - passiv



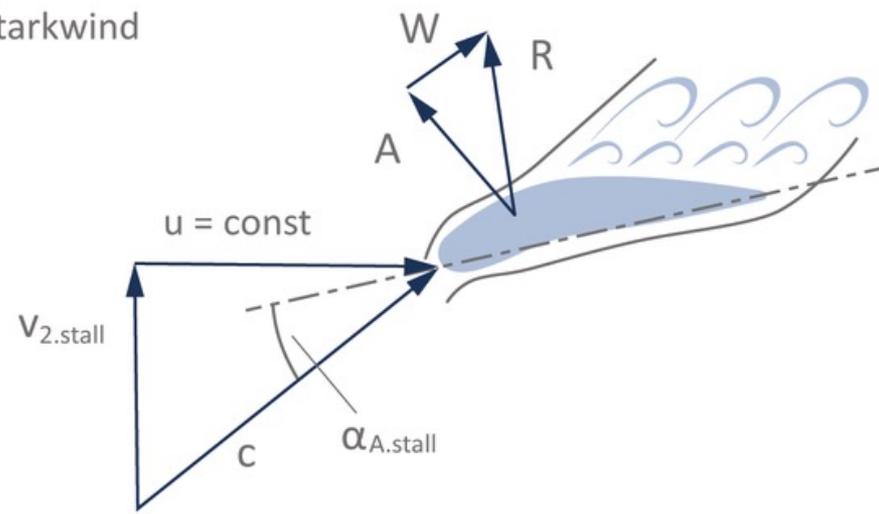
# Leistungsregelung

## Stall - passiv

Normalwind

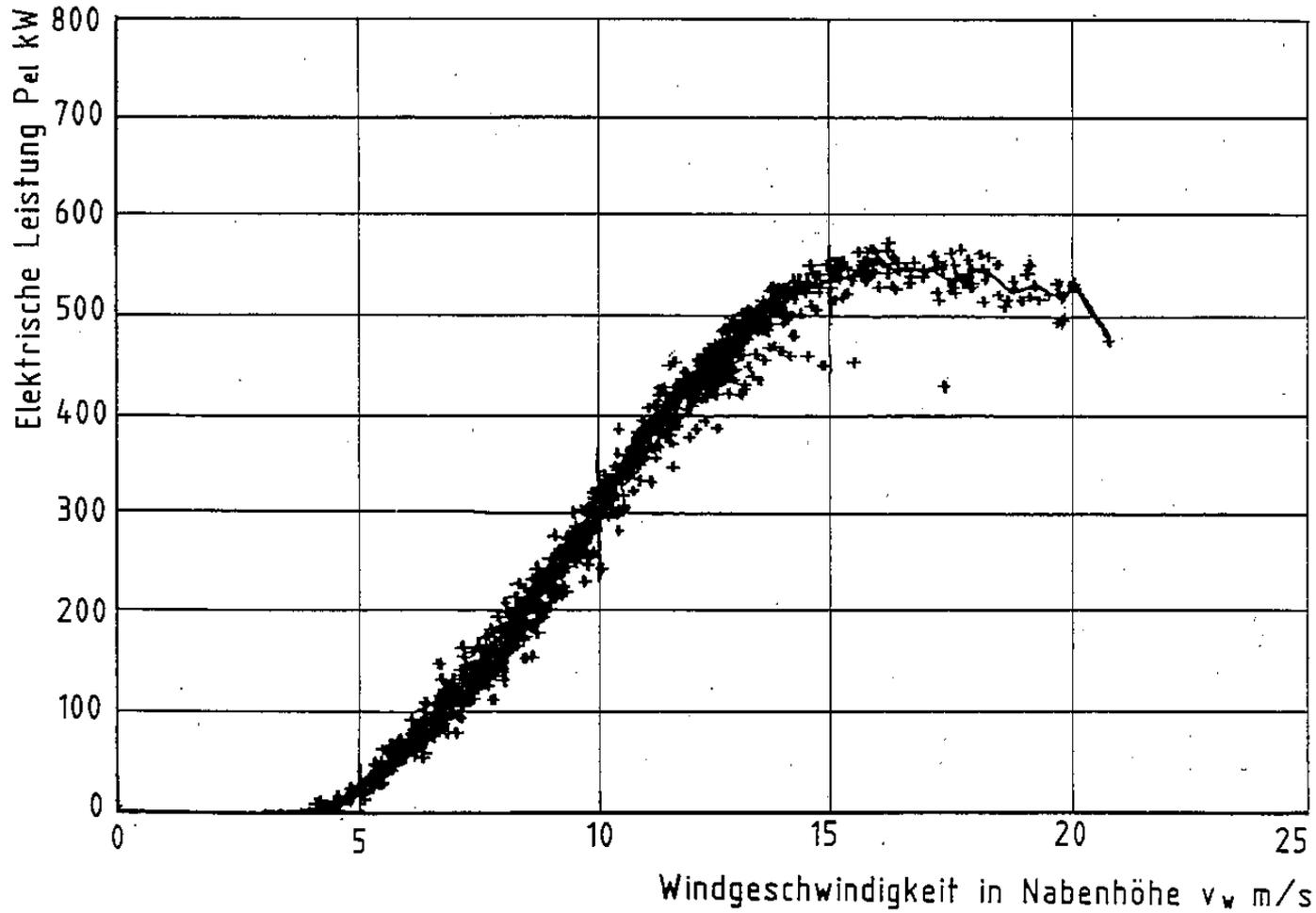


Starkwind

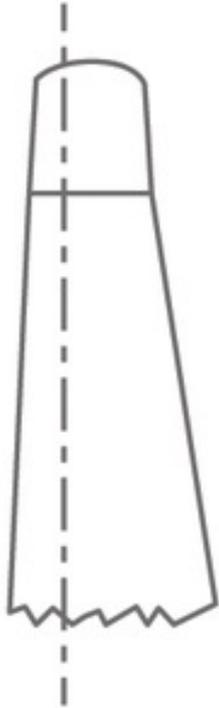


# Leistungskennlinie

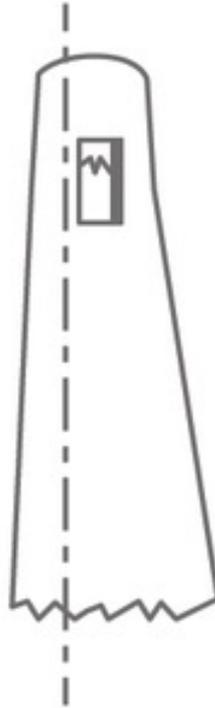
Stall - passiv



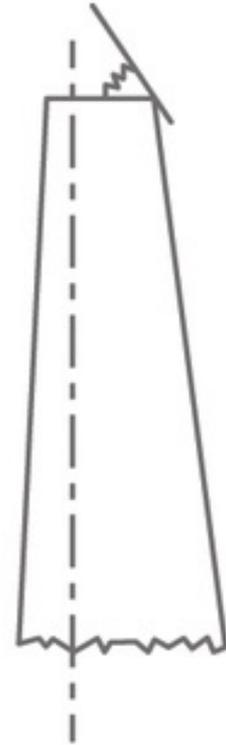
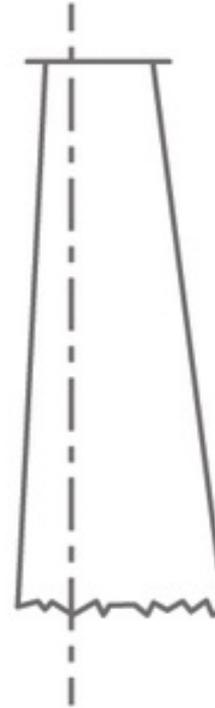
# Leistungsregelung Stall – passiv (Fliehkraftbremsen)



a)

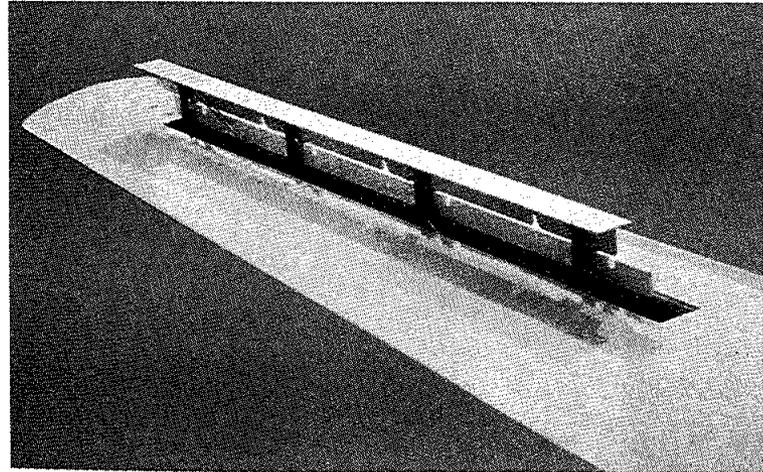
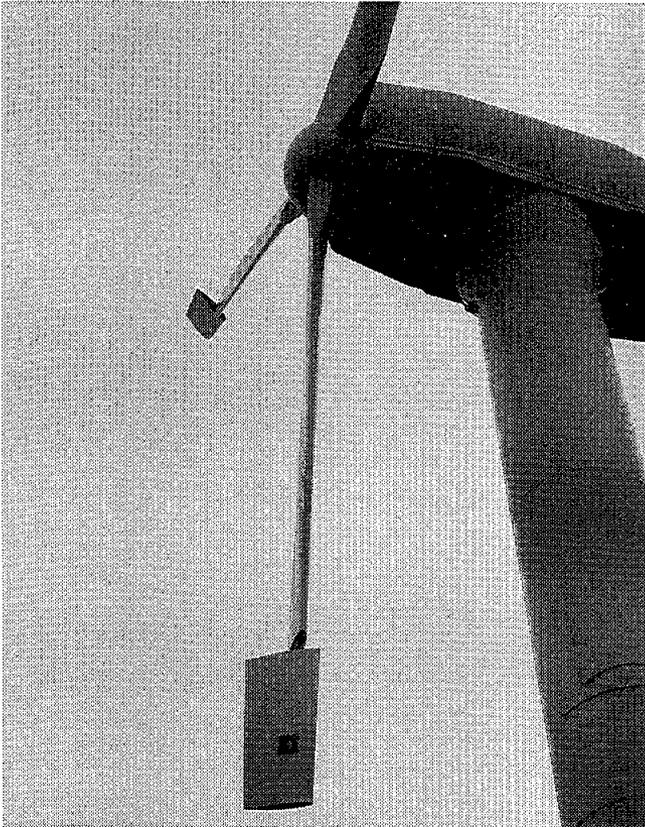


b)



c)

# Leistungsregelung Stall – passiv (Fliehkraftbremsen)



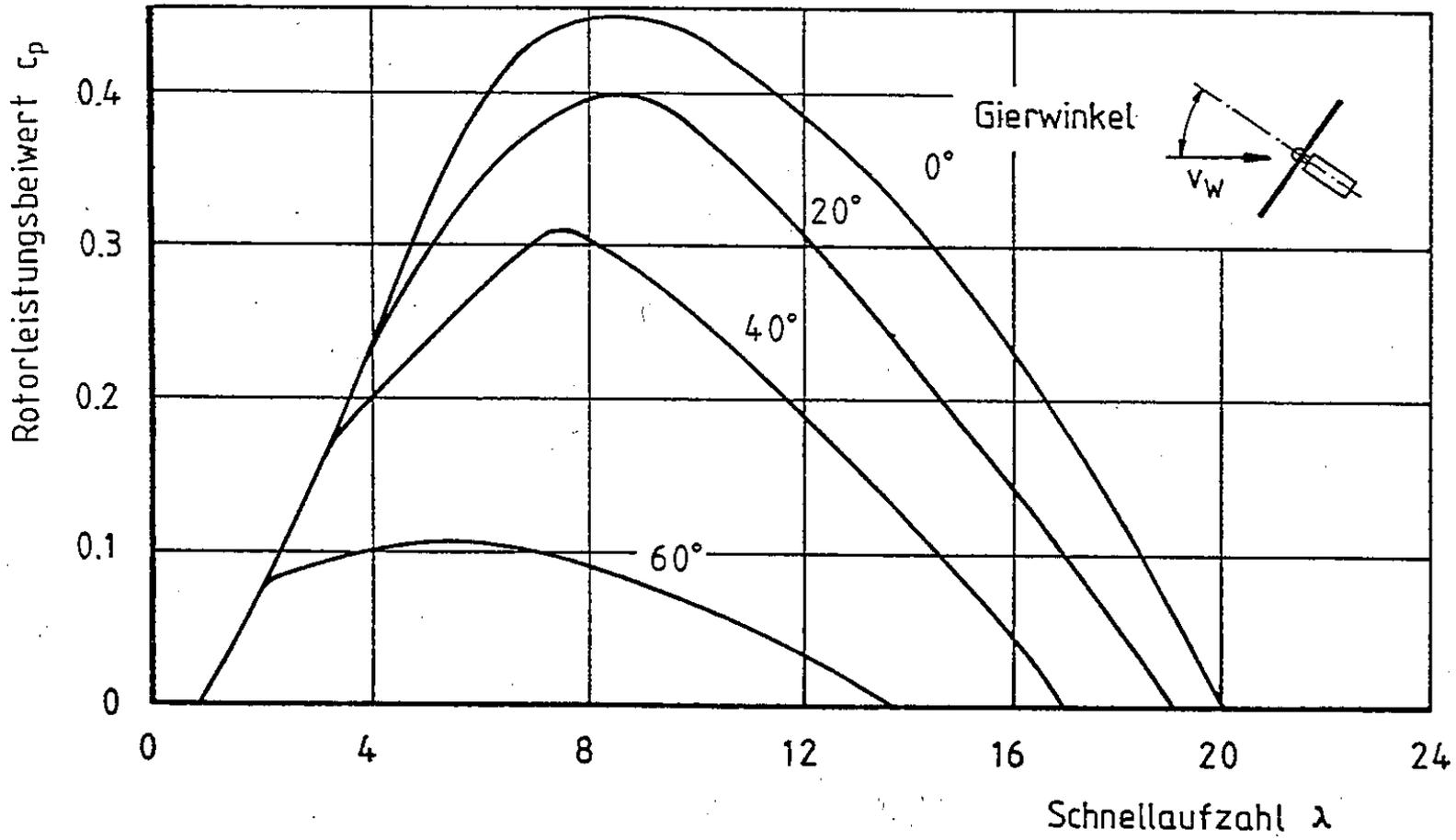
# Leistungsregelung

## Aus dem Wind drehen - Beispiel

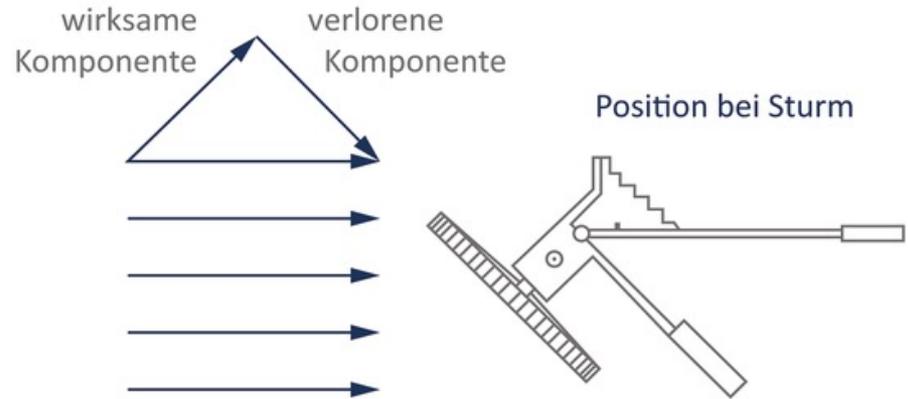
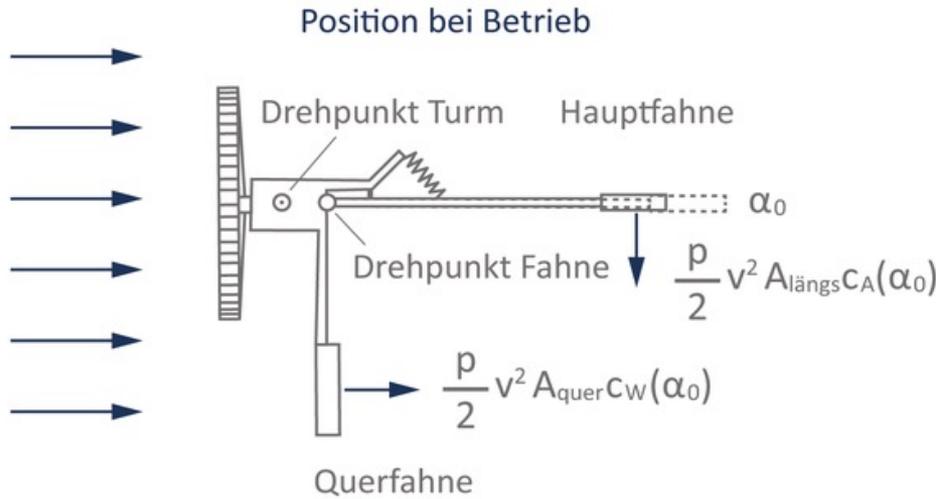


# Leistungsregelung

## Aus dem Wind nehmen

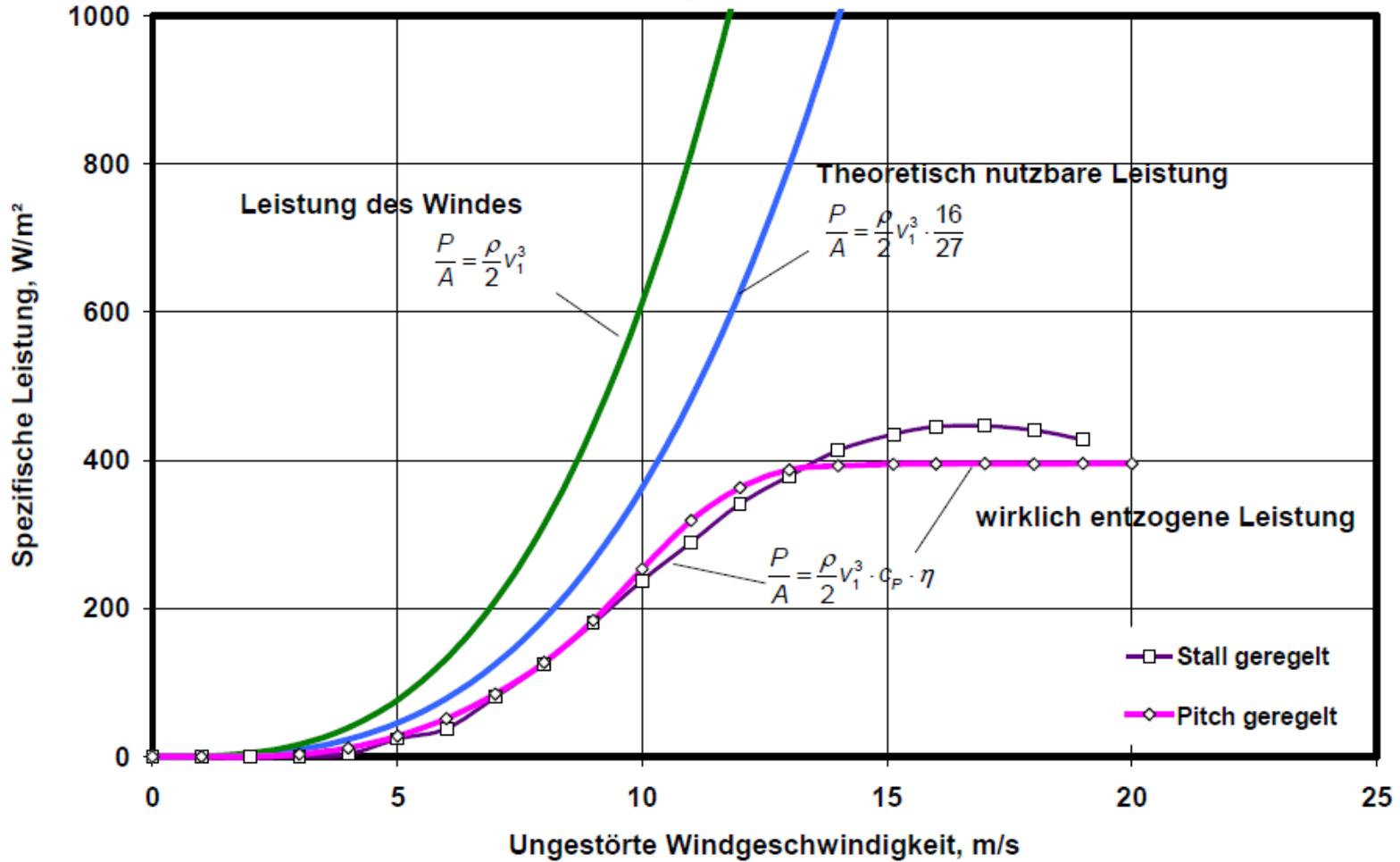


# Leistungsregelung Aus dem Wind nehmen



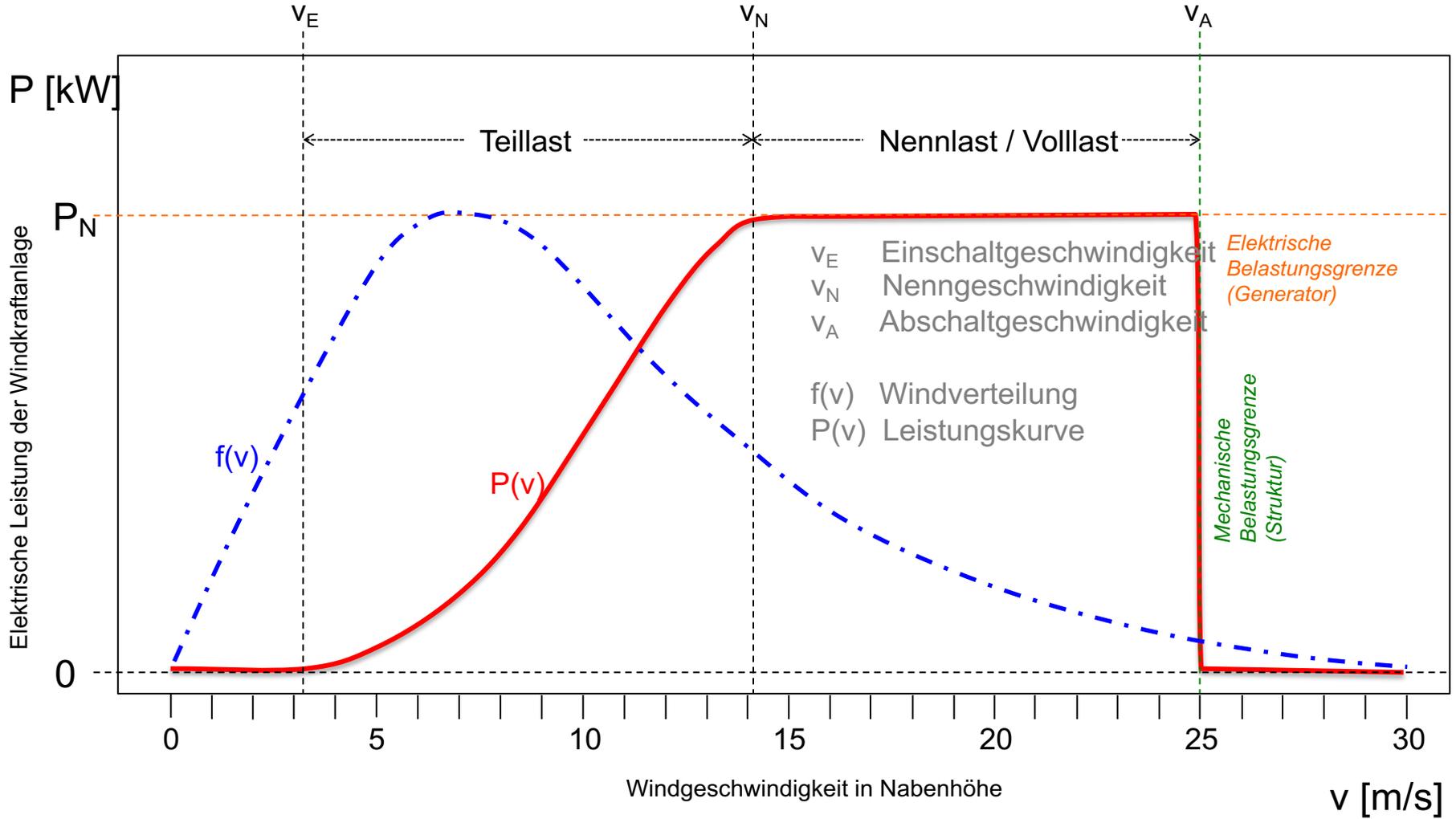
# Leistungskurven

## Leistungskurve



# Leistungskurve

## elektrische Abgabeleistung

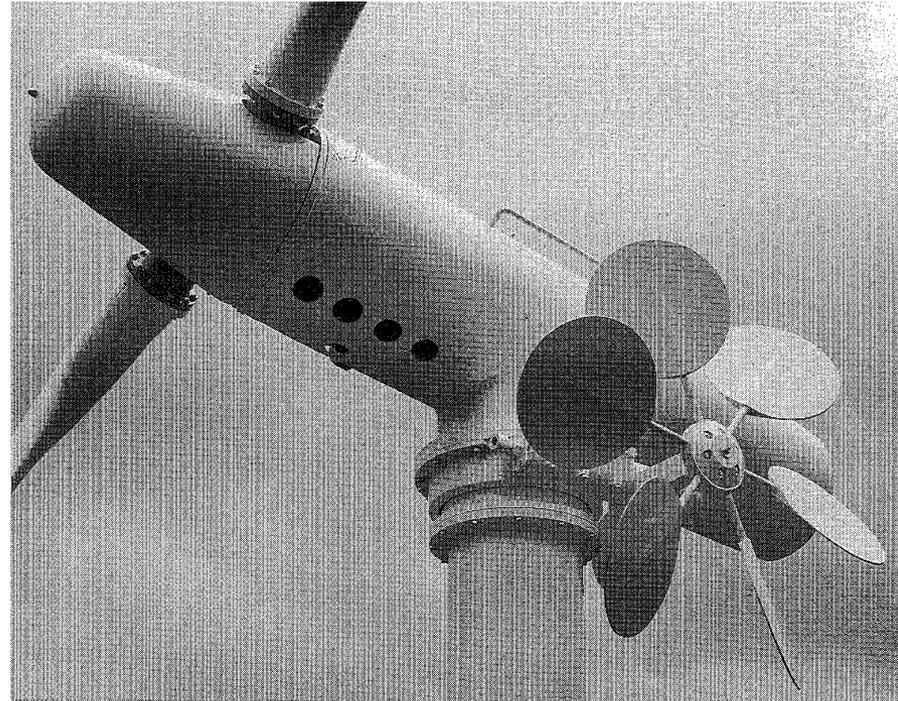


- Windfahne
- Seitenrad
- Lee-Läufer
- Azimutantrieb
- Darrieus

# Windrichtungsnachführung Windfahne

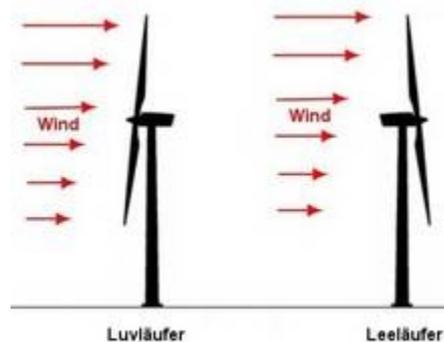
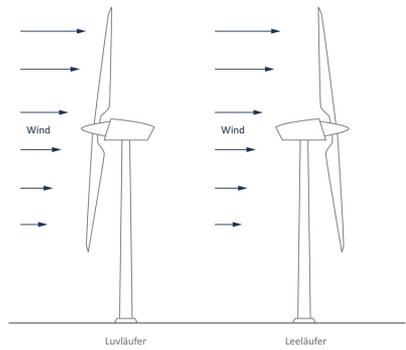


# Windrichtungsnachführung Seitenrad

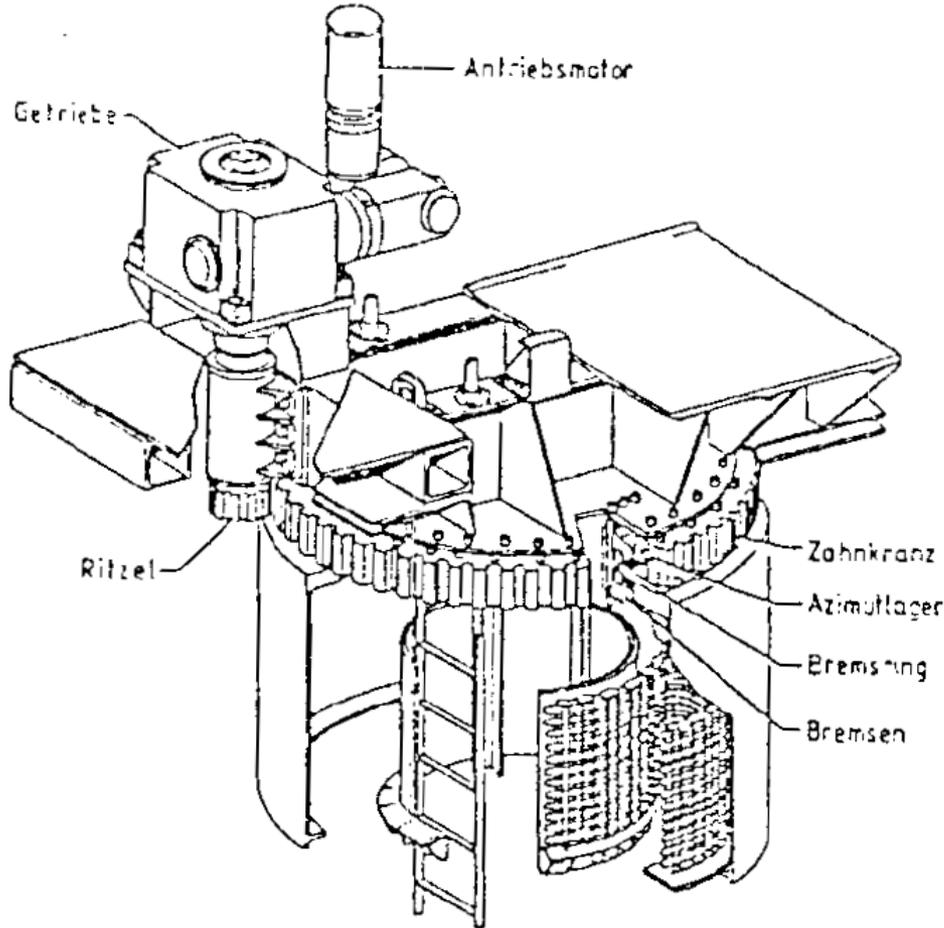


# Windrichtungsnachführung

## Lee-Läufer



# Windrichtungsnachführung Azimutantrieb

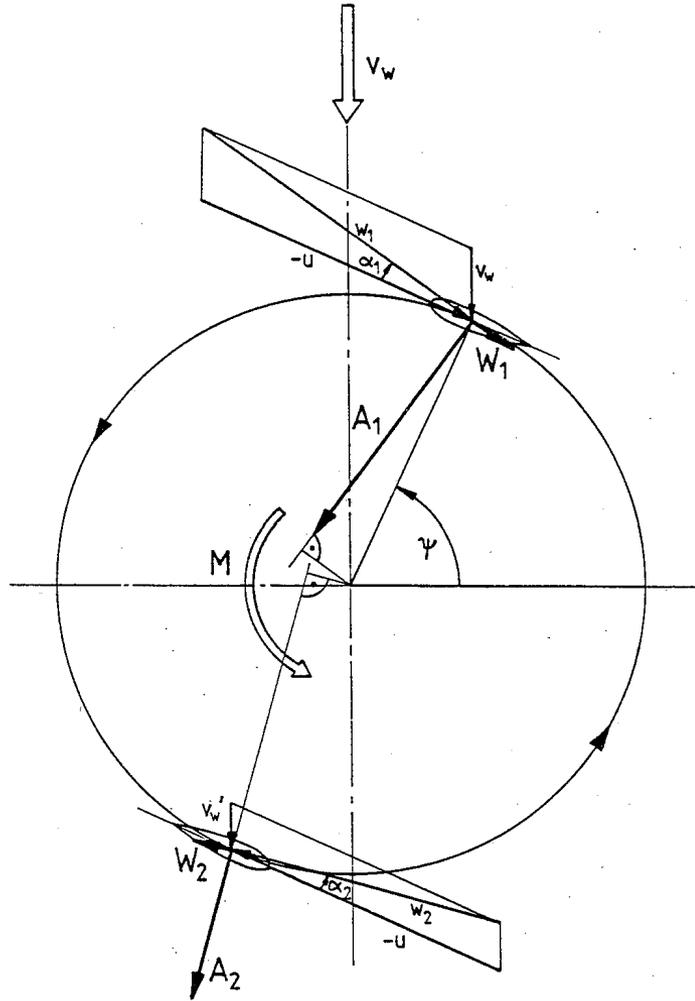


# Windrichtungsnachführung

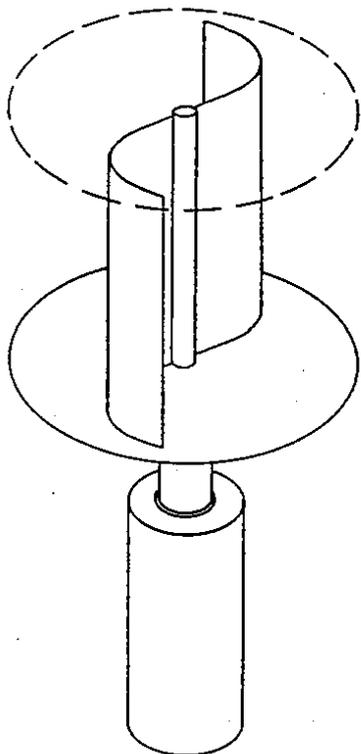
## Darrieus



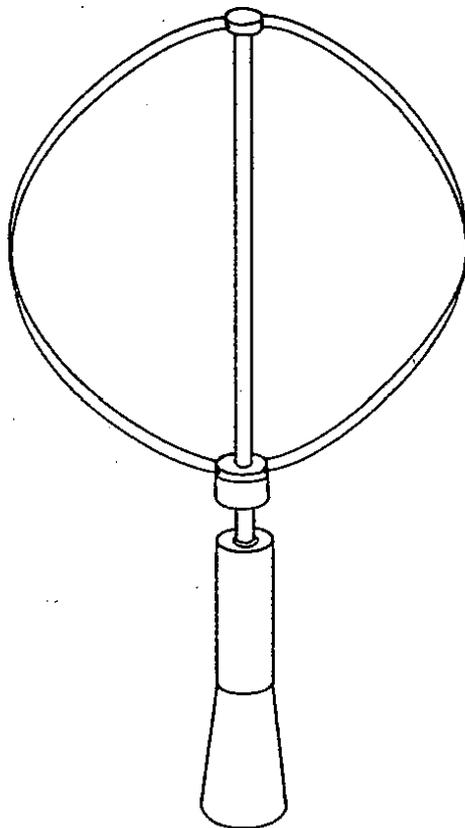
# Darrieus Funktion



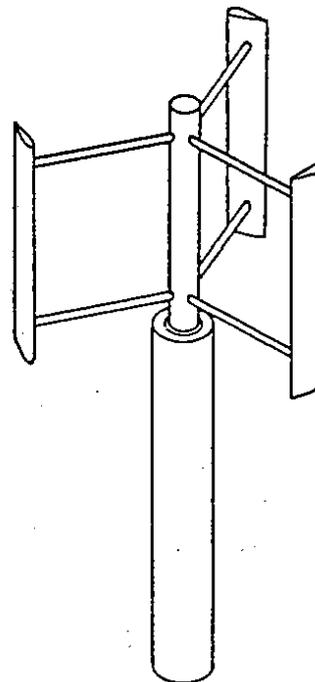
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor

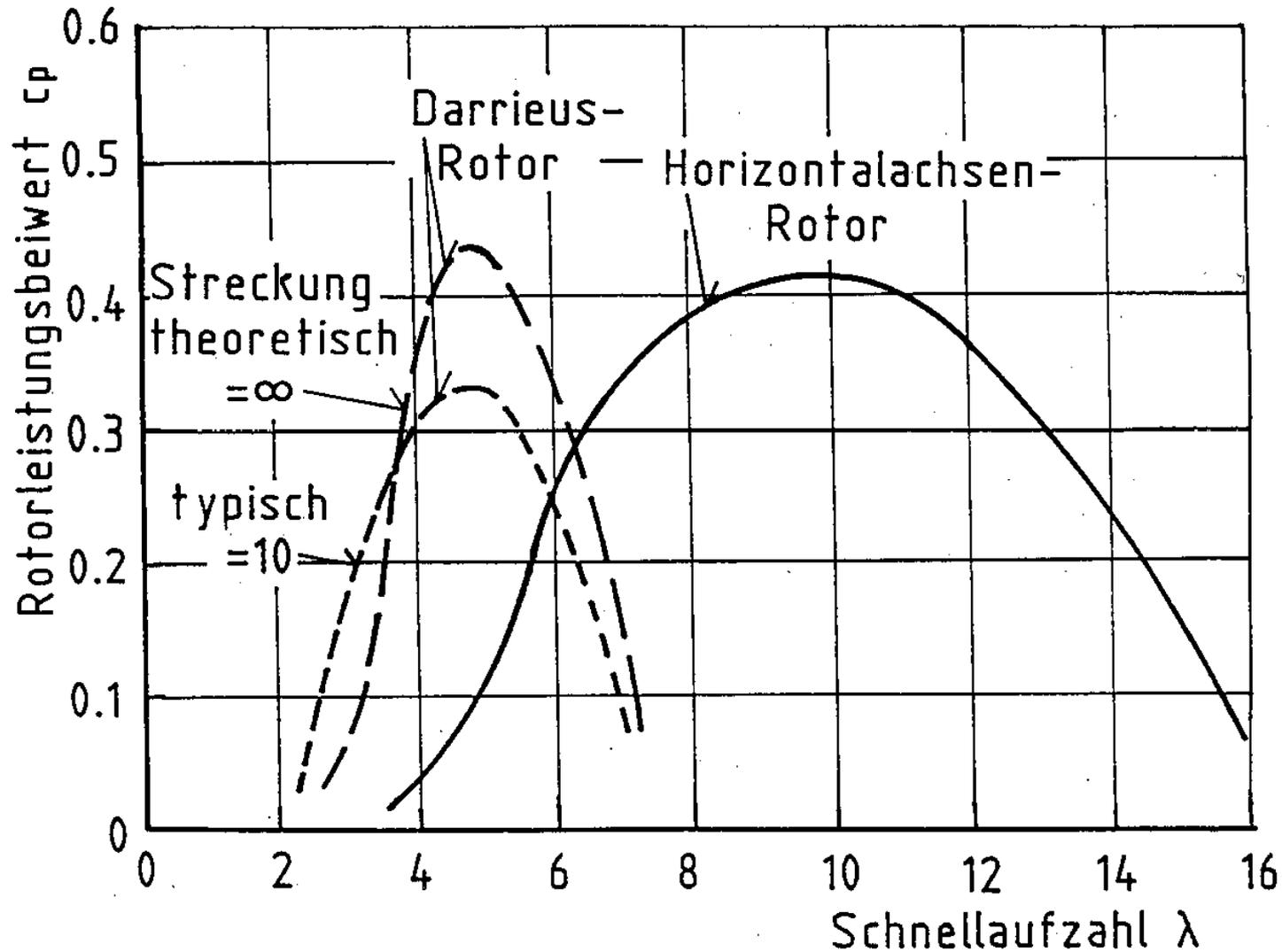


H-Darrieus-Rotor

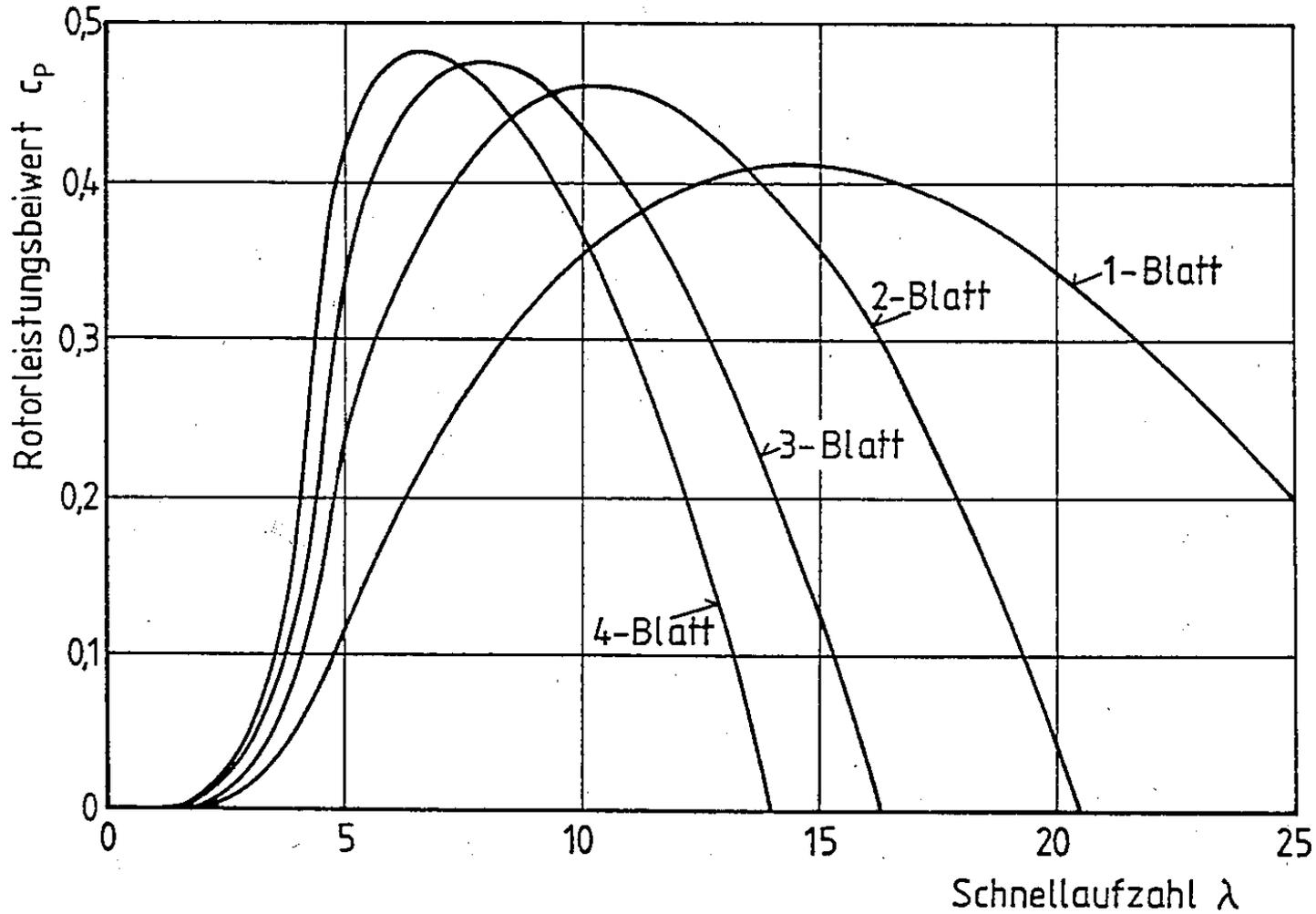


# Darrieus

## Leistungsbeiwert

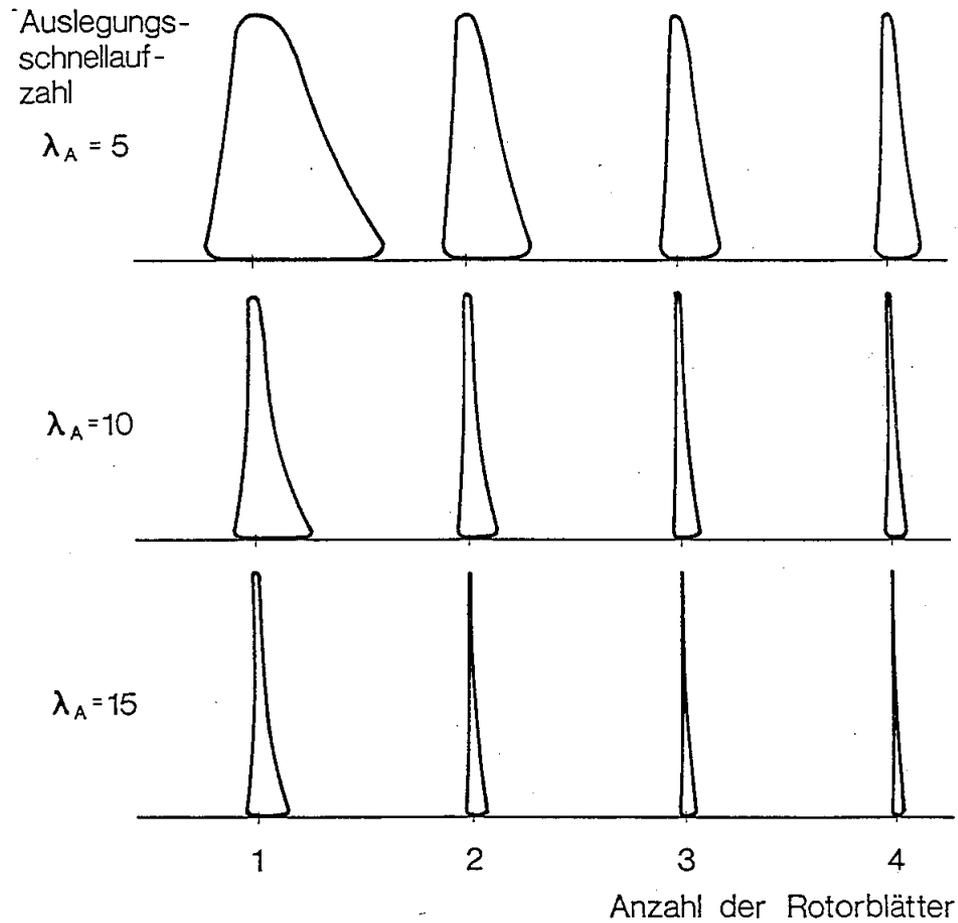


- Leistungsbeiwerte
  - Auftrieb
  - Widerstand
- Kosten / Bauteile
  - Oberflächenvergütung
  - Blattzahl
  - Gewicht
  - ...
- Die meisten Kennzahlen stehen in einem gewissen Widerspruch zueinander



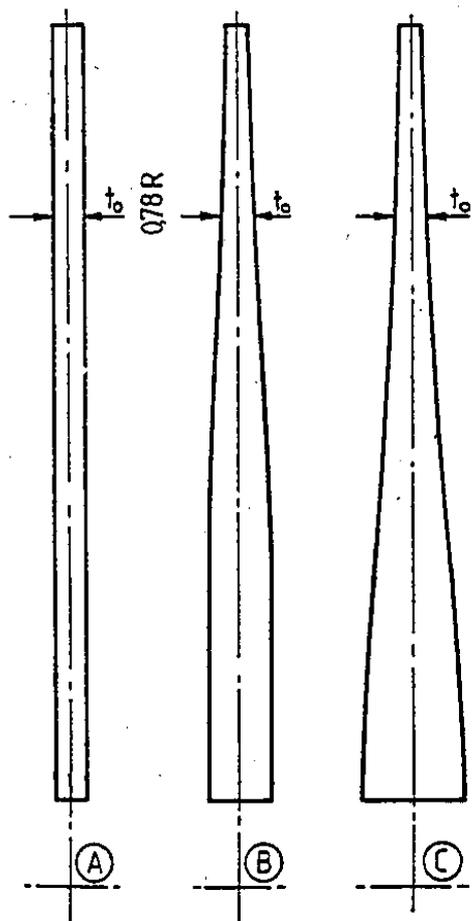
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Blattformen/zahl

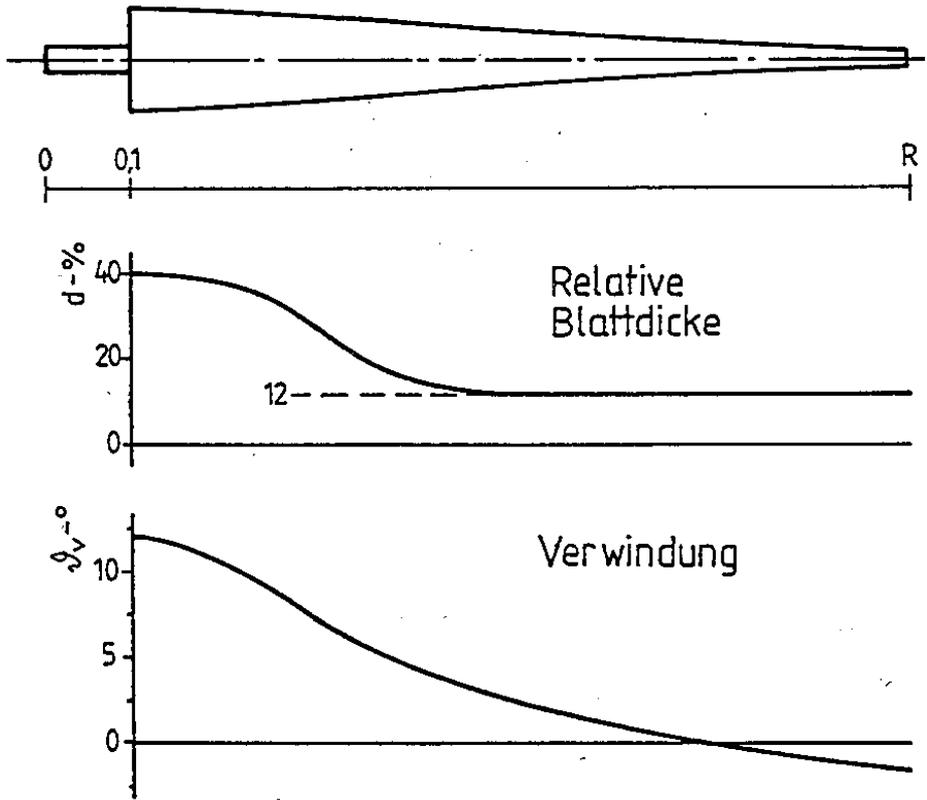


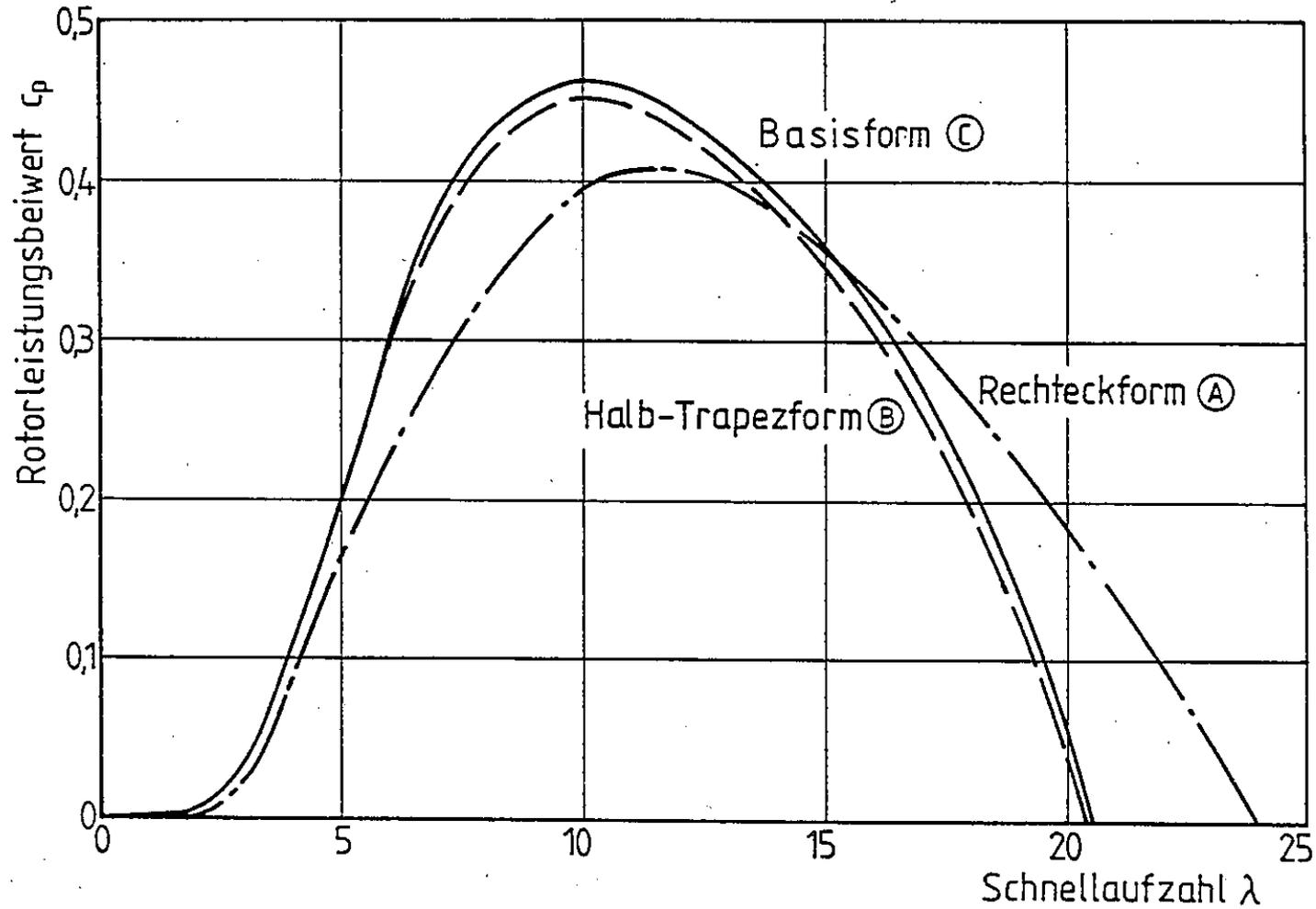
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Blattformen II



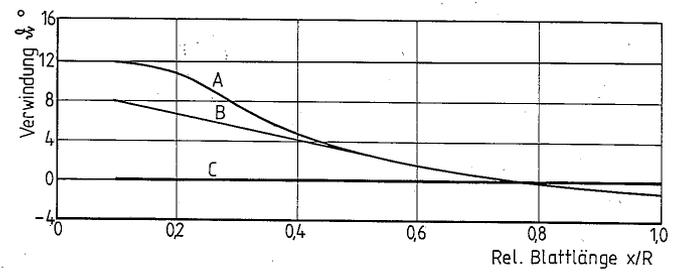
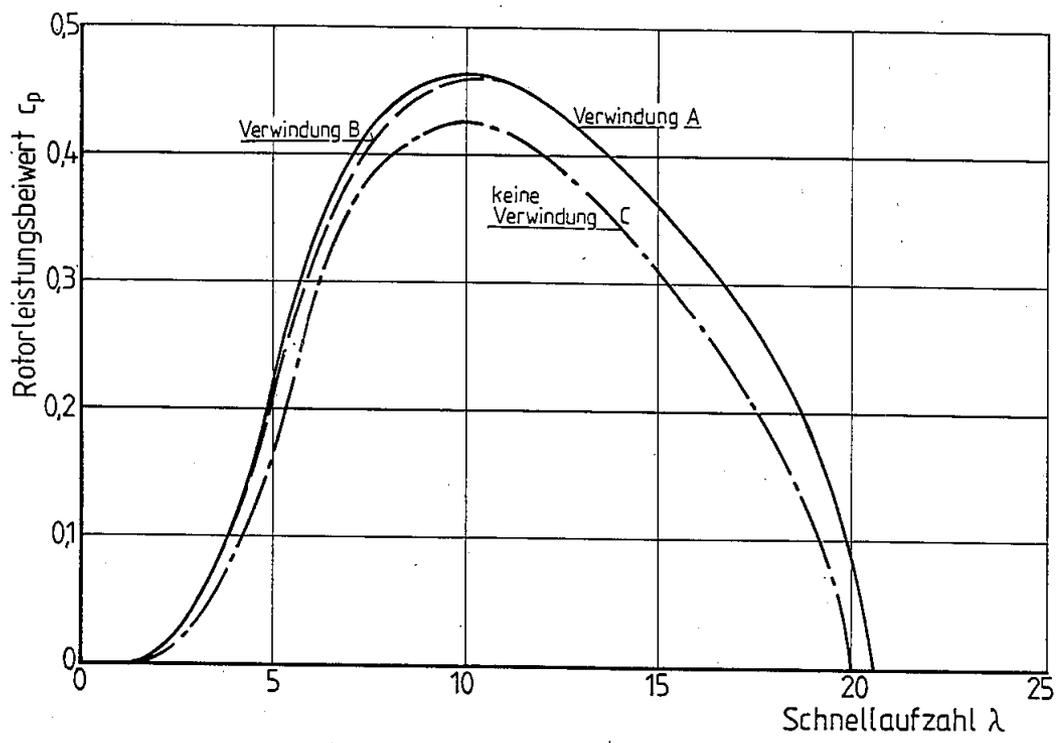
Basisform





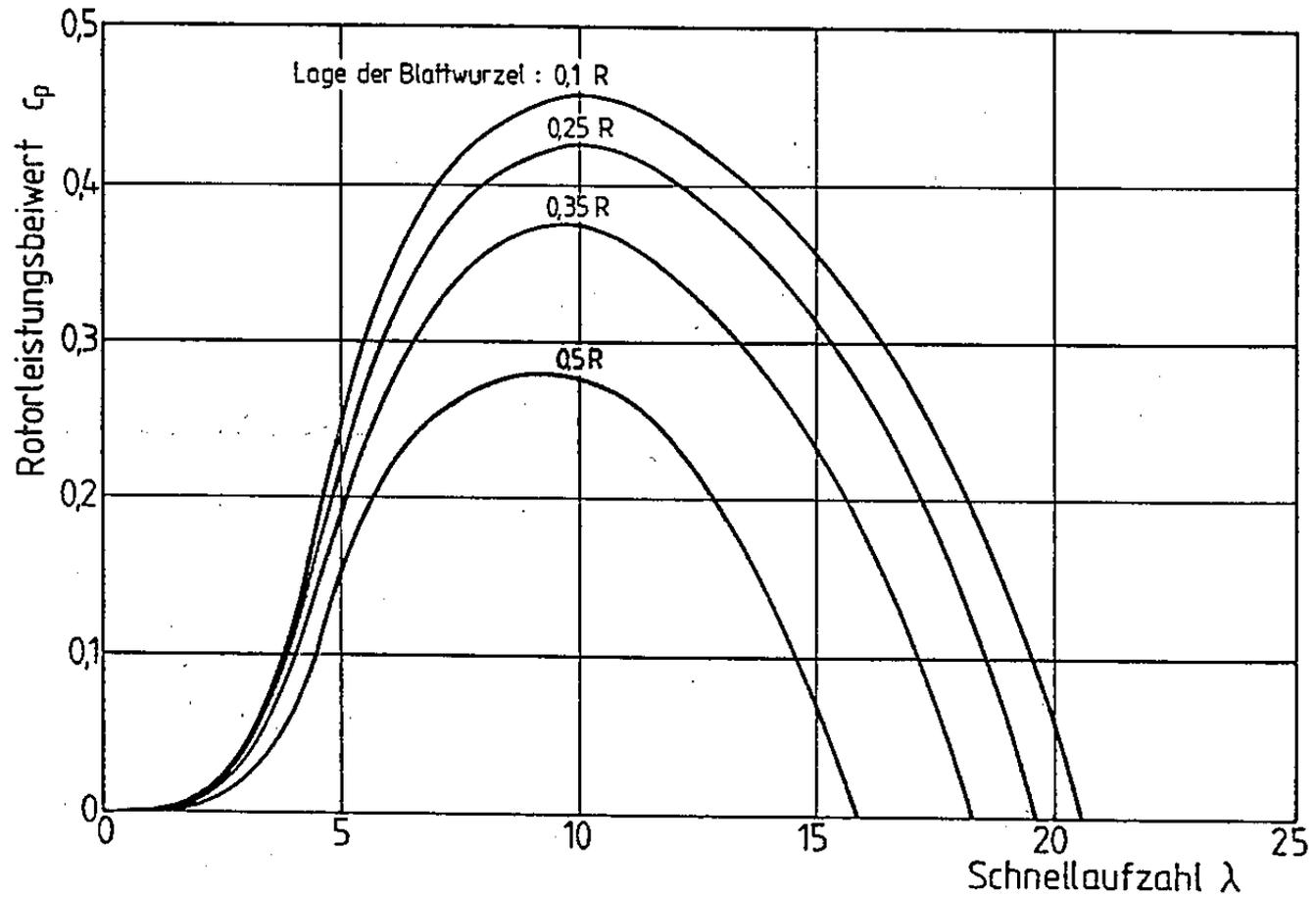
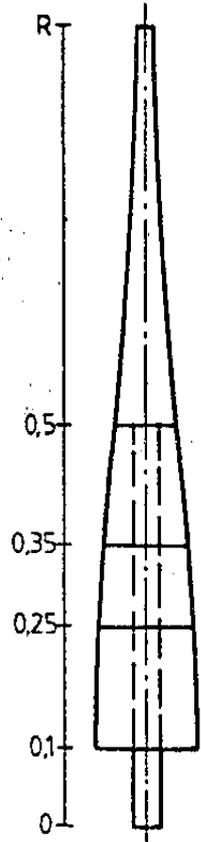
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Verwindung



# Aerodynamische Zusammenhänge

## Blattwurzel



# Aerodynamische Zusammenhänge

## Blattspitzen



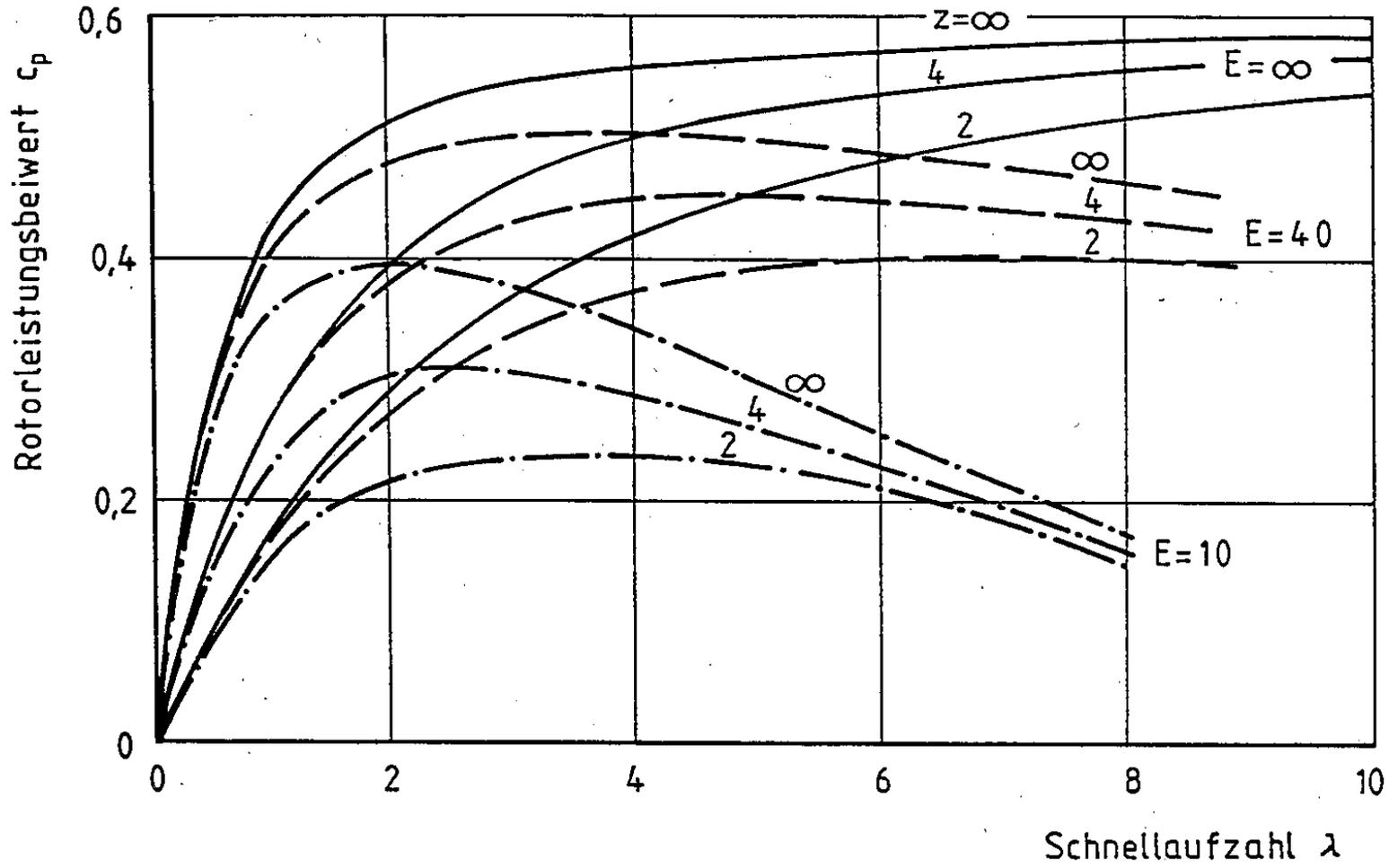
Standard

gerade Hinterkante

Shark

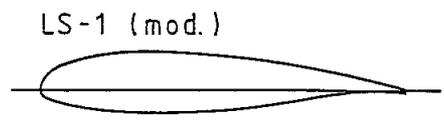
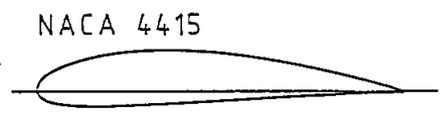
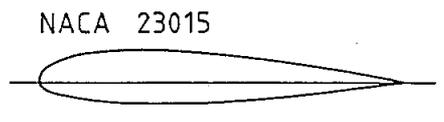
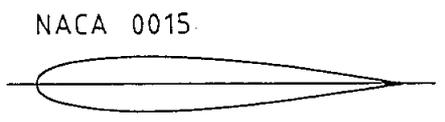
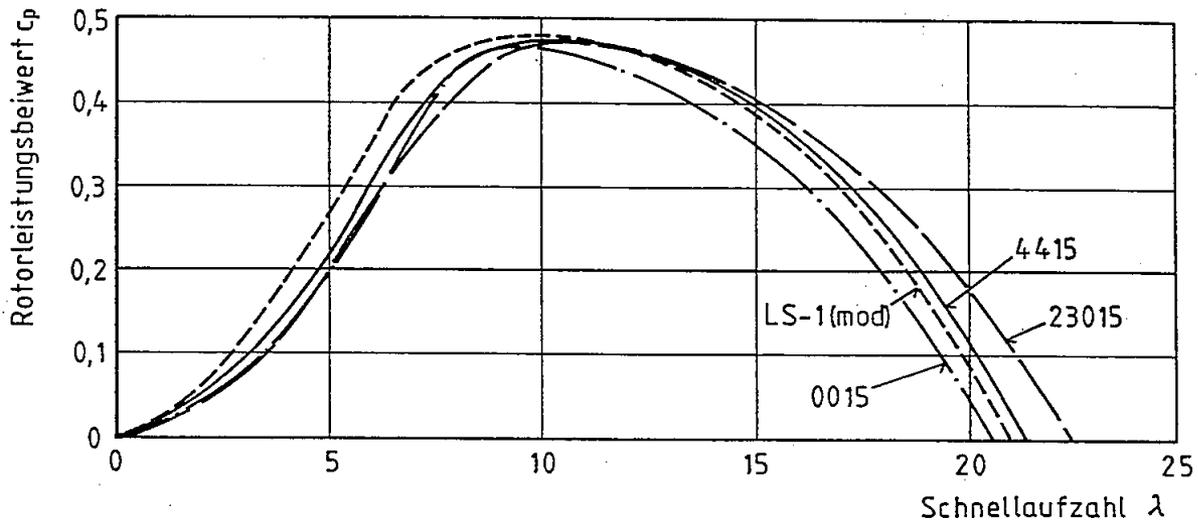
Ogee

Endscheibe



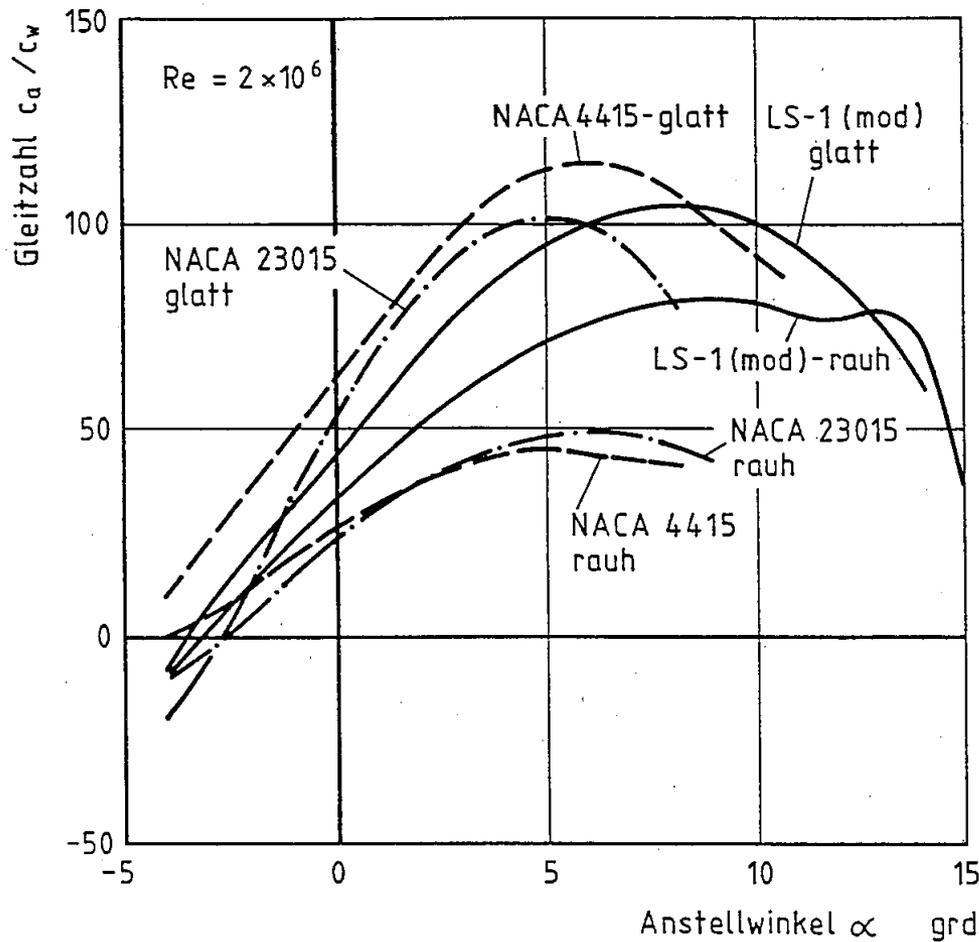
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Profilarten



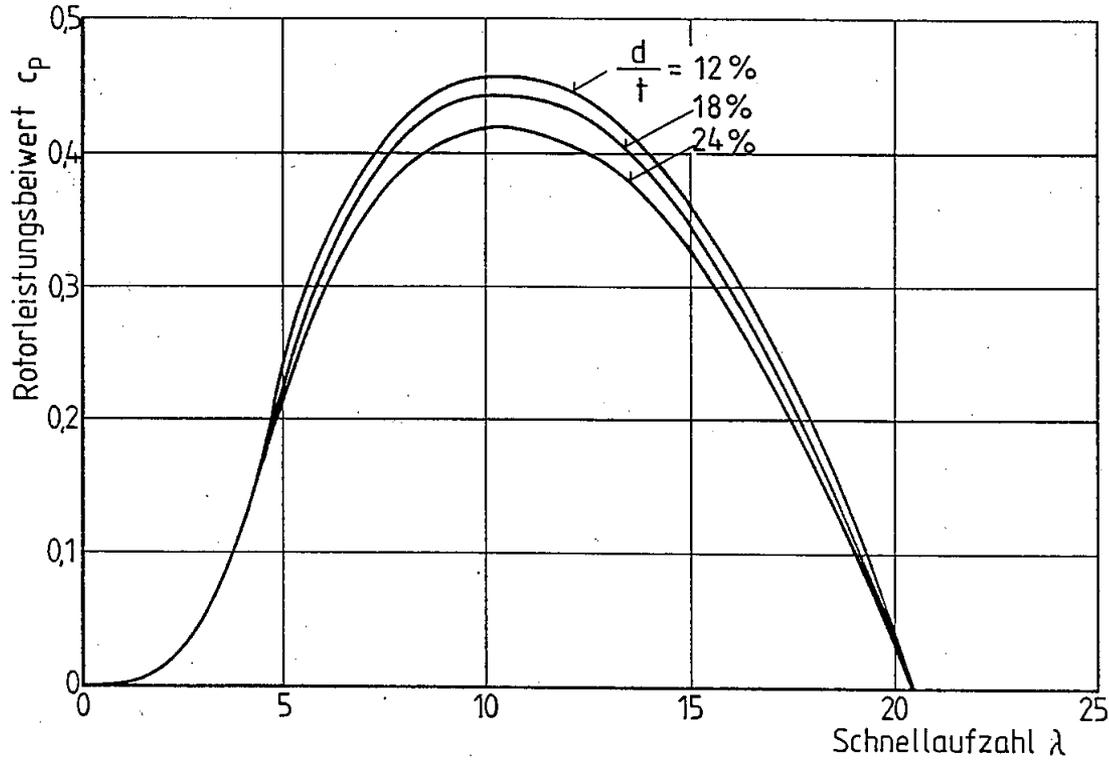
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Oberflächengüte



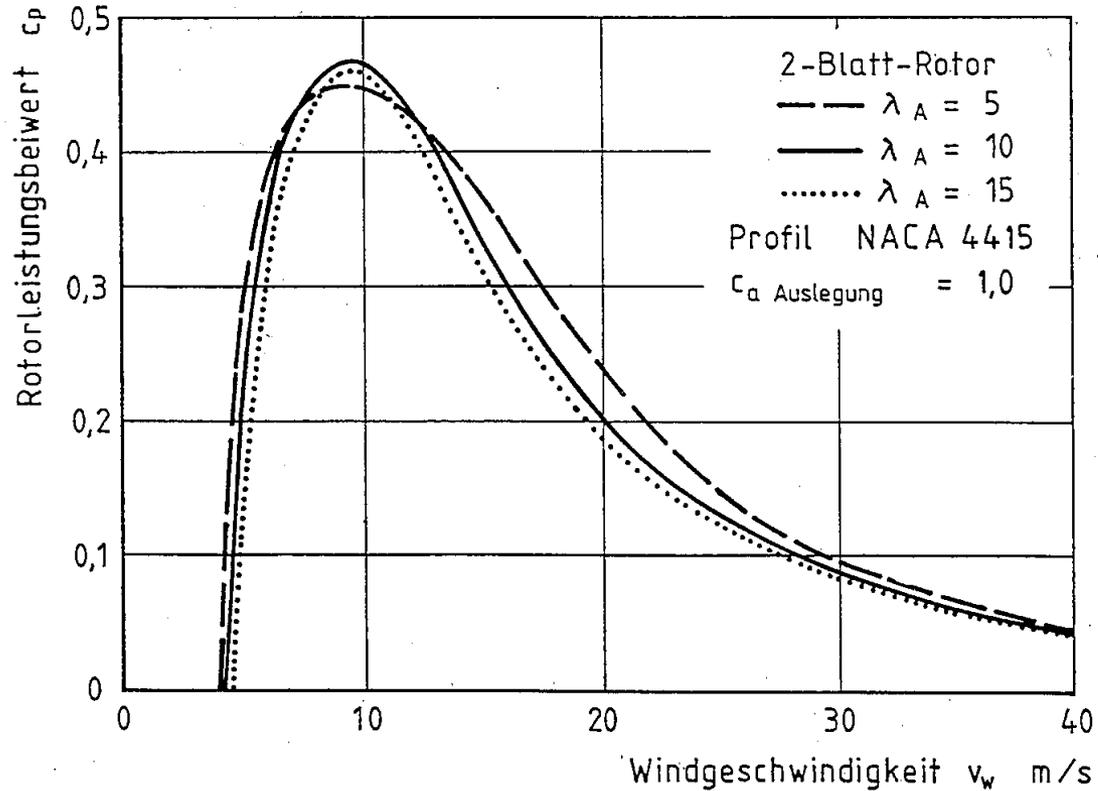
# Aerodynamische Zusammenhänge

## Profildicke



# Aerodynamische Zusammenhänge

$\lambda/v$



# Aerodynamische Zusammenhänge

$$\lambda/\lambda_a$$

