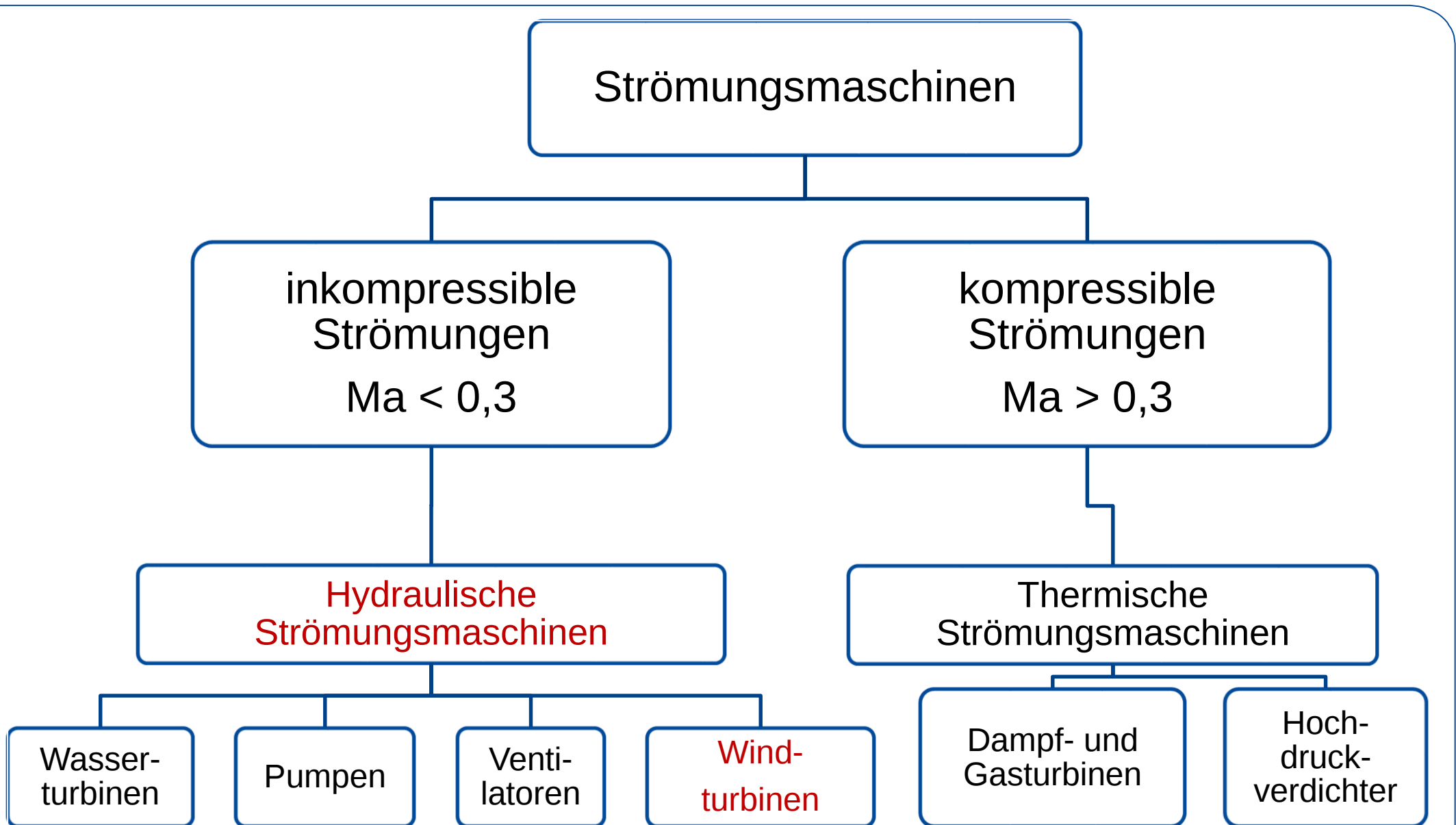


Sommersemester 2018

Kolben- und Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- Aufbau und Funktionsweise von Flugtriebwerken und den enthaltenen Strömungsmaschinen
- **Aufbau und Funktionsweise von Windturbinen**
- Aufbau, Funktionsweise und Betriebsverhalten von Pumpen
- Entwurfsmethoden
- Optimierungsmethoden

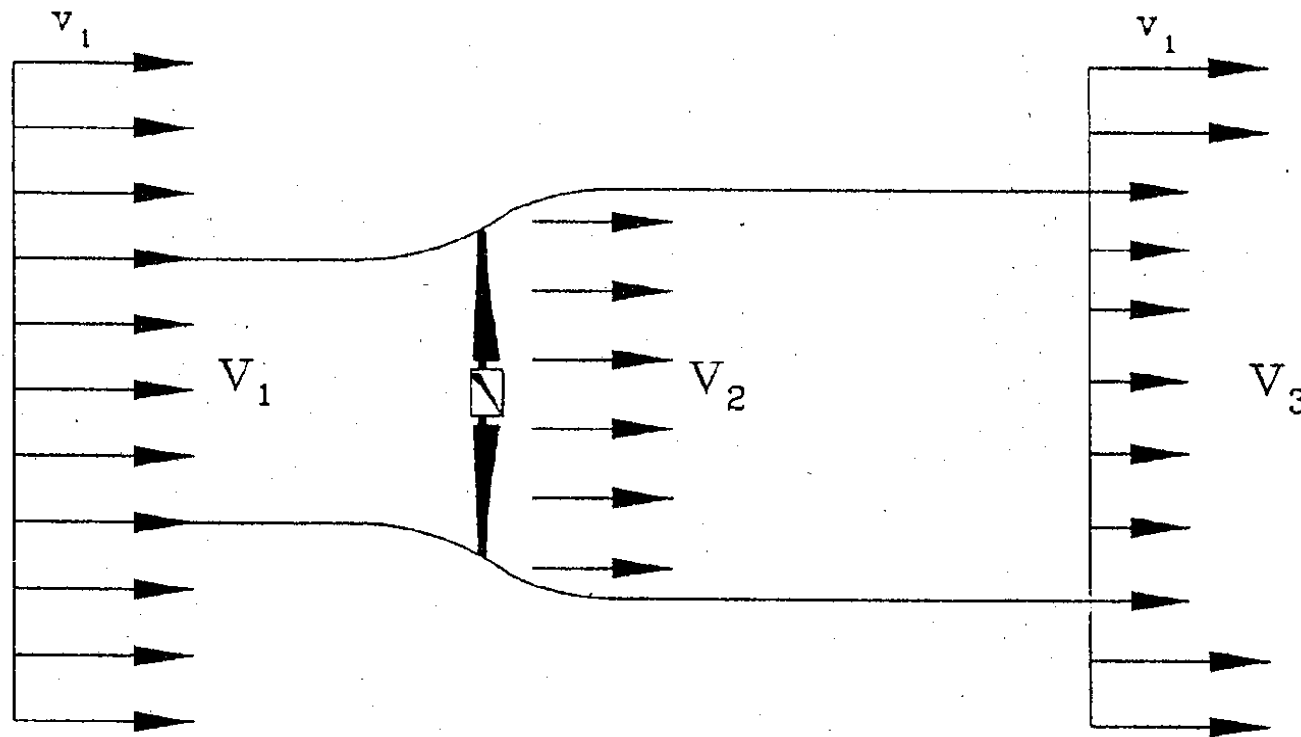


Energie des Windes

$$E = \frac{1}{2} mc_1^2 \quad (1)$$

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

es folgt: $P = \frac{\rho}{2} \cdot c_1^3 \cdot A$ (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

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

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

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

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

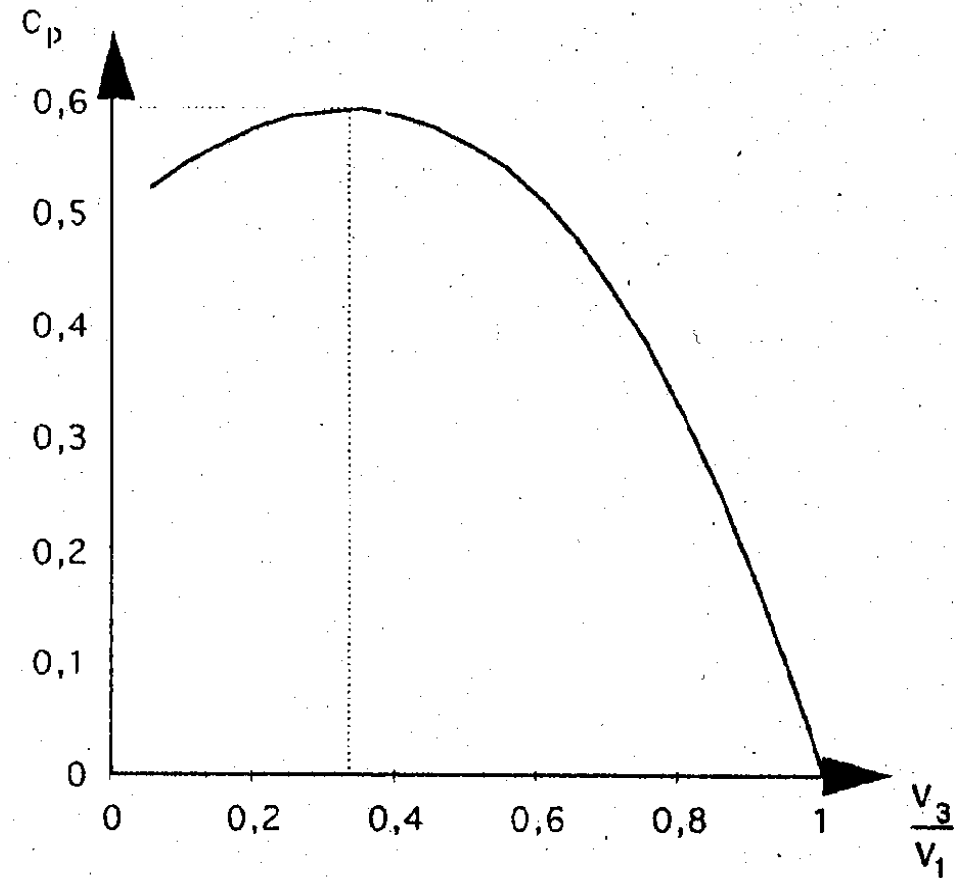
$$c_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{c_3}{c_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{c_3}{c_1} \right)$$

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

es ergibt sich:

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

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

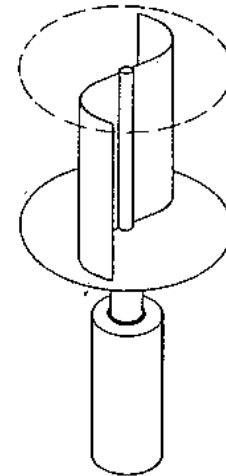


Leistungsbeiwert c_p in Abhängigkeit von dem Verhältnis
Windgeschwindigkeit c_3 hinter dem Windrad zur
Windgeschwindigkeit c_1 vor dem Windrad

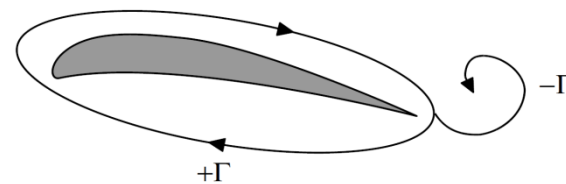
Quelle: Gasch, R. : Windkraftanlagen

- durch den Widerstand eines Körpers
- durch den Auftrieb eines Körpers

- Widerstandsläufer



- Auftriebsläufer (mit vertikaler oder horizontaler Achse)



Kräfte, die vom Fluid auf einen umströmten Körper ausgeübt werden:

- Kraft parallel zur Anströmrichtung – Widerstandkraft
- Kraft senkrecht zur Anströmrichtung - Auftriebskraft

Prinzip der Entstehung der Auftriebskraft an einem umströmten Körper

Zirkulation: Gesamtaussage über die Drehung in einem großen Bereich

Für die geschlossene Kurve I wird das skalare Produkt

Wegelement $\times$ Geschwindigkeit

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

$$\Gamma = \oint_C \mathbf{c} \cdot d\mathbf{l}$$

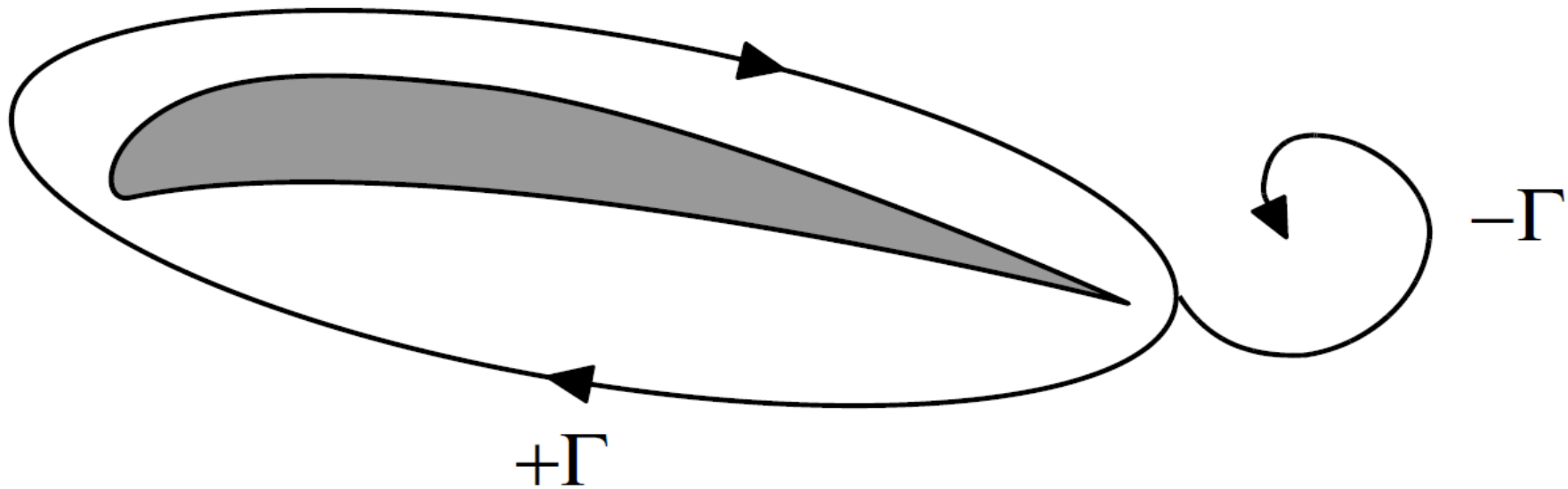
Zirkulation

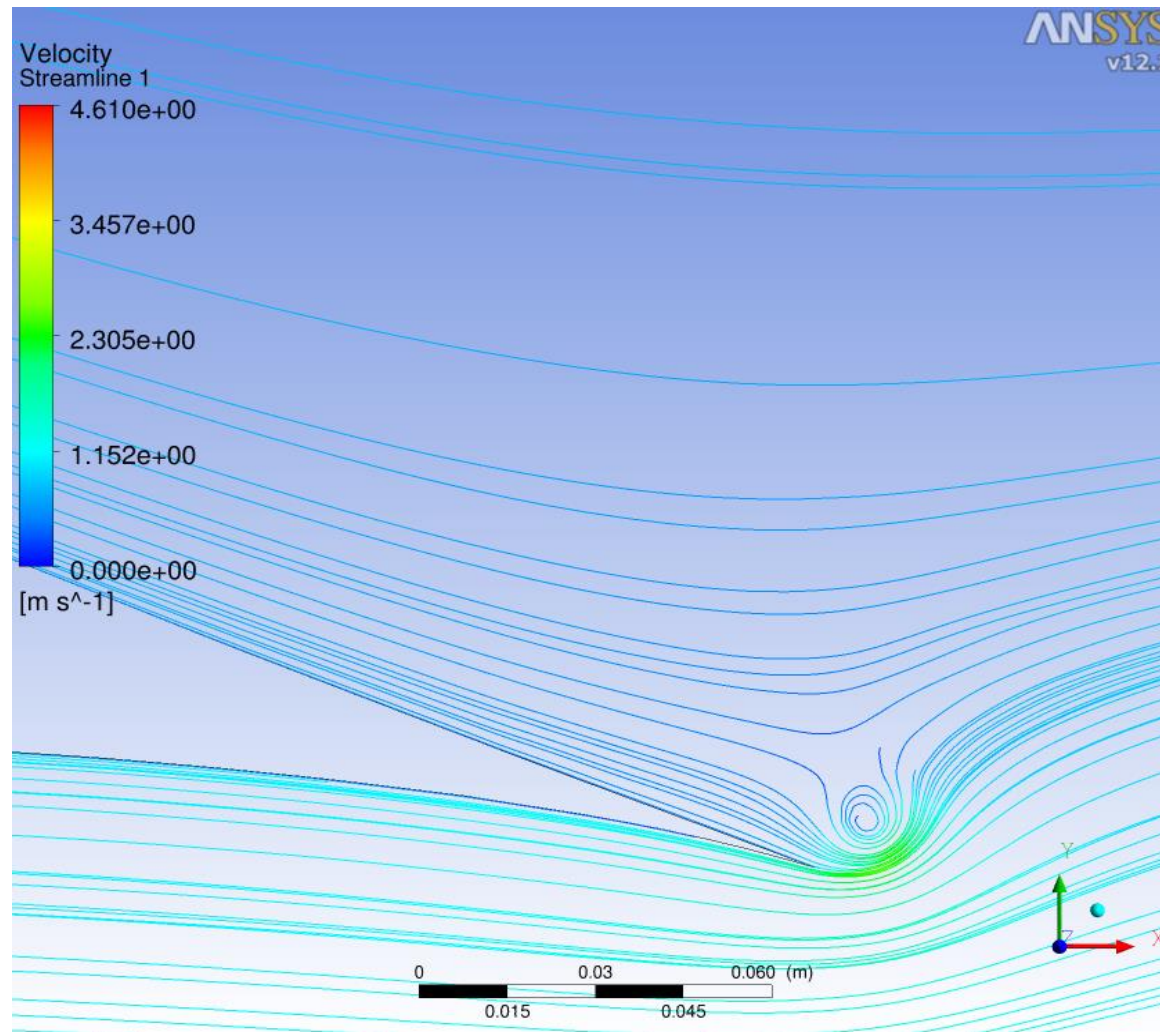
$$\Gamma = \oint c_{\text{tan}} dl$$

Auftriebskraft

(Satz von Kutta, Joukowski)

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





gerechneter Anfahrwirbel hinter einem umströmten Profil nach 0.015 s bei einem Anstellwinkel von 8 Grad

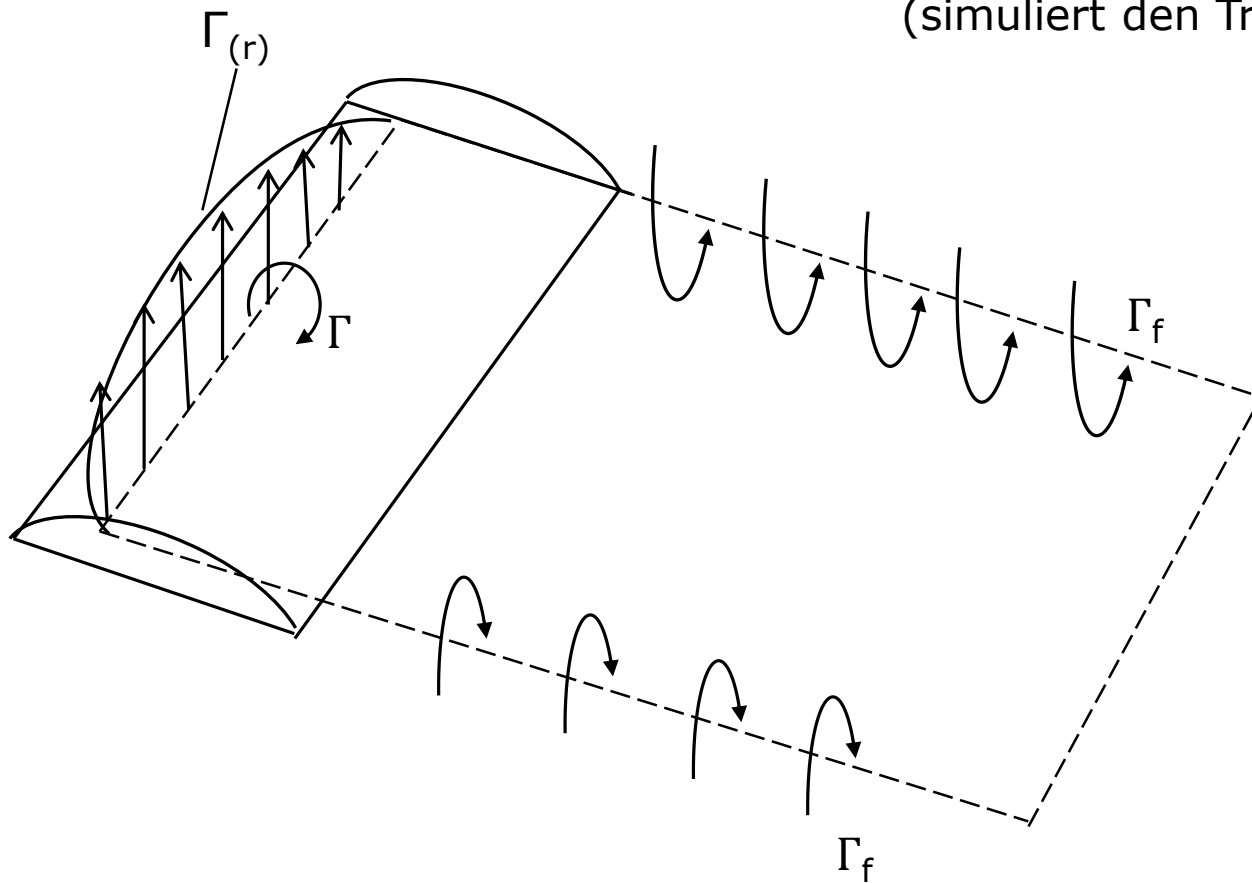
1. Die Wirbelstärke einer Wirbelröhre ist konstant.
2. Wirbelröhren bestehen immer aus denselben materiellen Teilchen.
3. Die Zirkulation einer Wirbelröhre bleibt zeitlich konstant.

Aus den Helmholtzschen Wirbelsätzen ergeben sich die für Windturbinenschaufeln typischen Wirbelstrukturen.

Die Ableitung des Biot-Savartschen Gesetzes erfolgte eigentlich, um einen Zusammenhang zwischen der magnetischer Feldstärke H und der Stromdichte J herzustellen.

Angewandt auf die Strömungsmechanik folgt aus dem Biot-Savartschen Gesetz, dass ein Wirbelelement in einem Fluid an der Stelle P eine Geschwindigkeit $\mathbf{c}$ induziert.

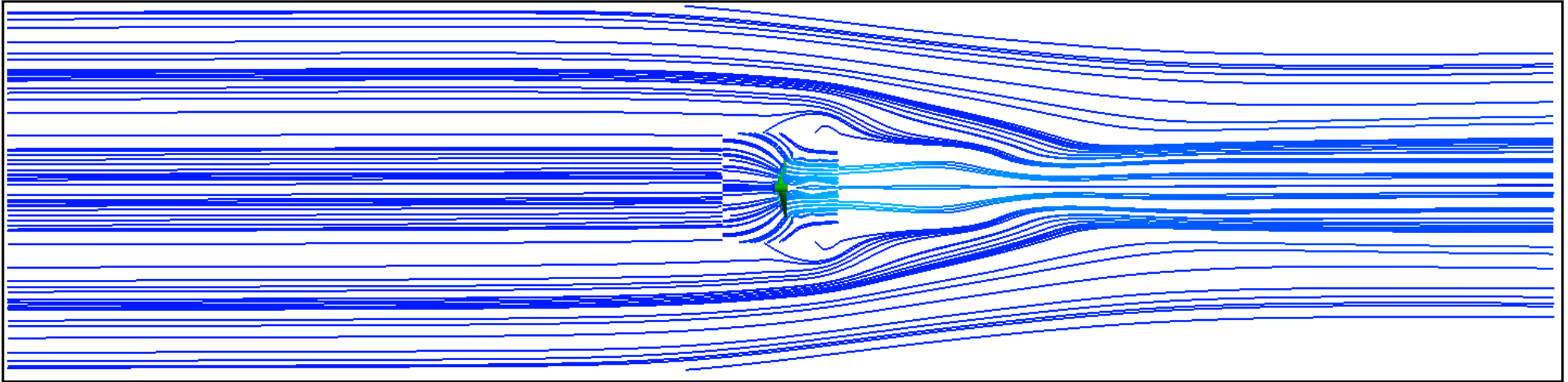
$\Gamma_{(r)}$...Zirkulation des gebundenen Wirbels
(simuliert den Tragflügel)



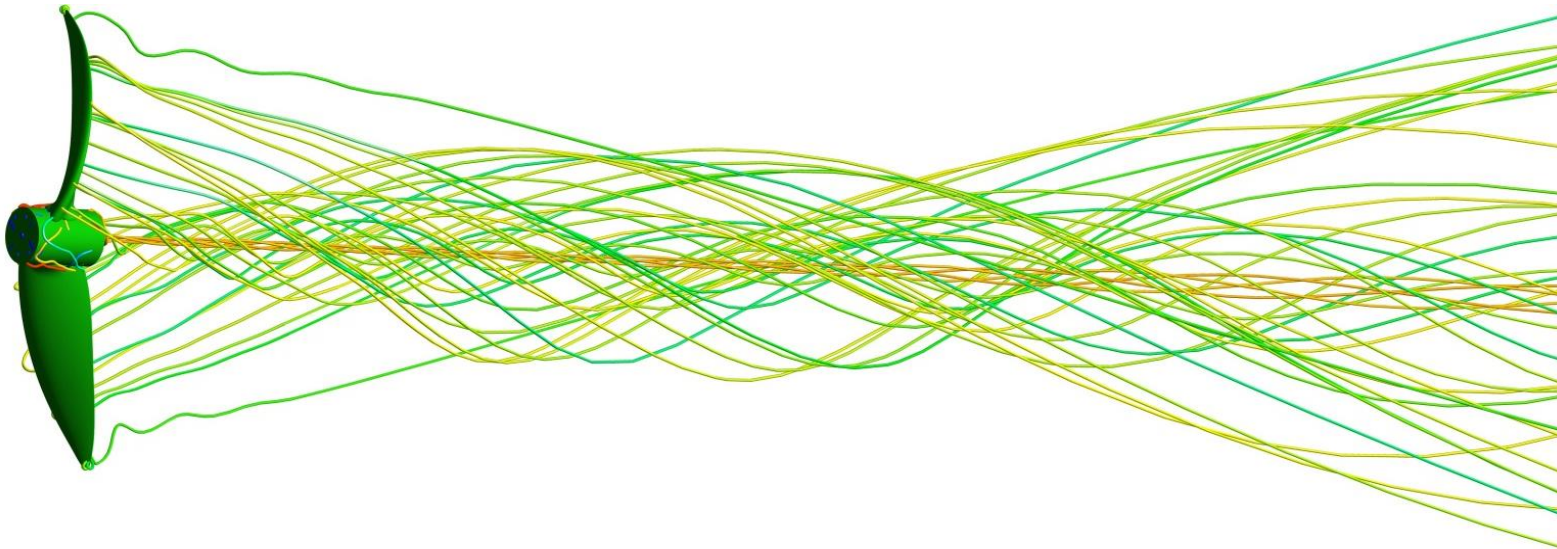
$\Gamma_{(f)}$...freie Wirbel

Tafelbild: Randwirbel

Simulationsergebnisse (in diesem Fall Rotor zur Schuberzeugung)

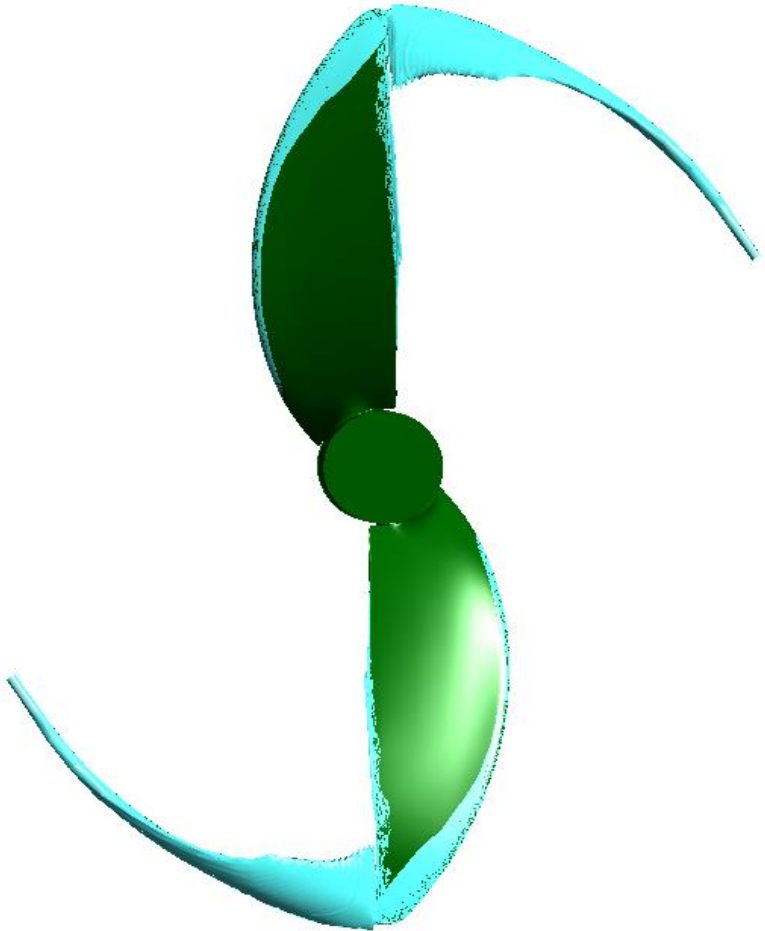


Velocity in stationary frame (Surface streamlines)

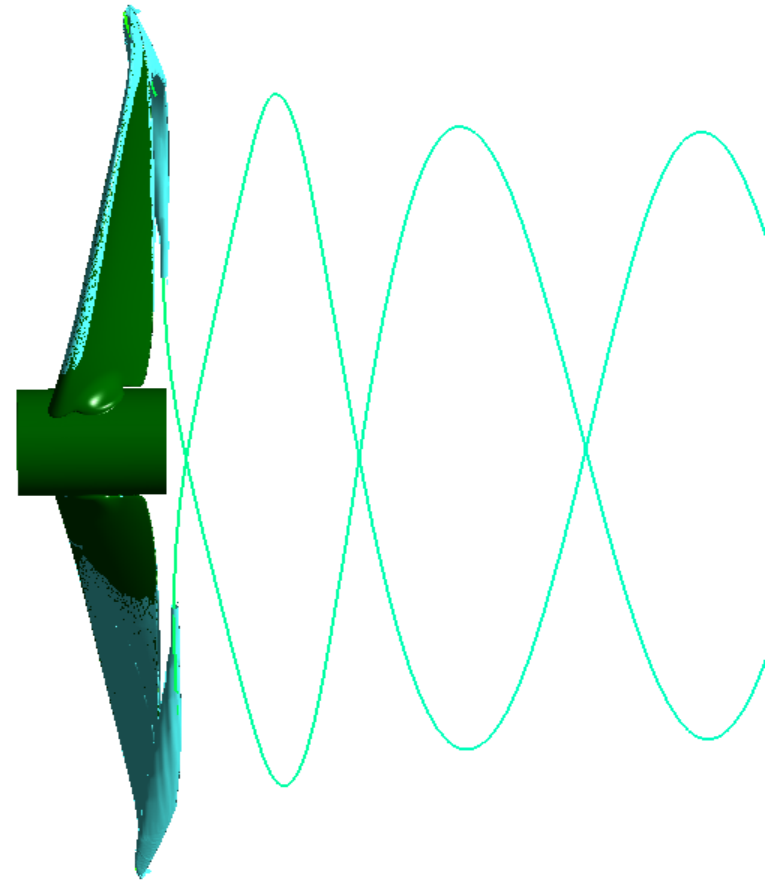


Velocity in stationary frame (3D streamlines)

Spitzenwirbel aus der Simulation einer Propulsionseinrichtung



Absolute Helicity



Streamlines for tip vortex

üblicherweise werden die Widerstands- und die Auftriebskraft auf den Staudruck bezogen, es folgen

- für den Widerstandsbeiwert:
$$c_w = \frac{F_w}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

und für den Auftriebsbeiwert:
$$c_a = \frac{F_A}{0.5 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A}$$

Aufbau von Windkraftanlagen und Funktion der einzelnen Bauteile

Universität
Rostock



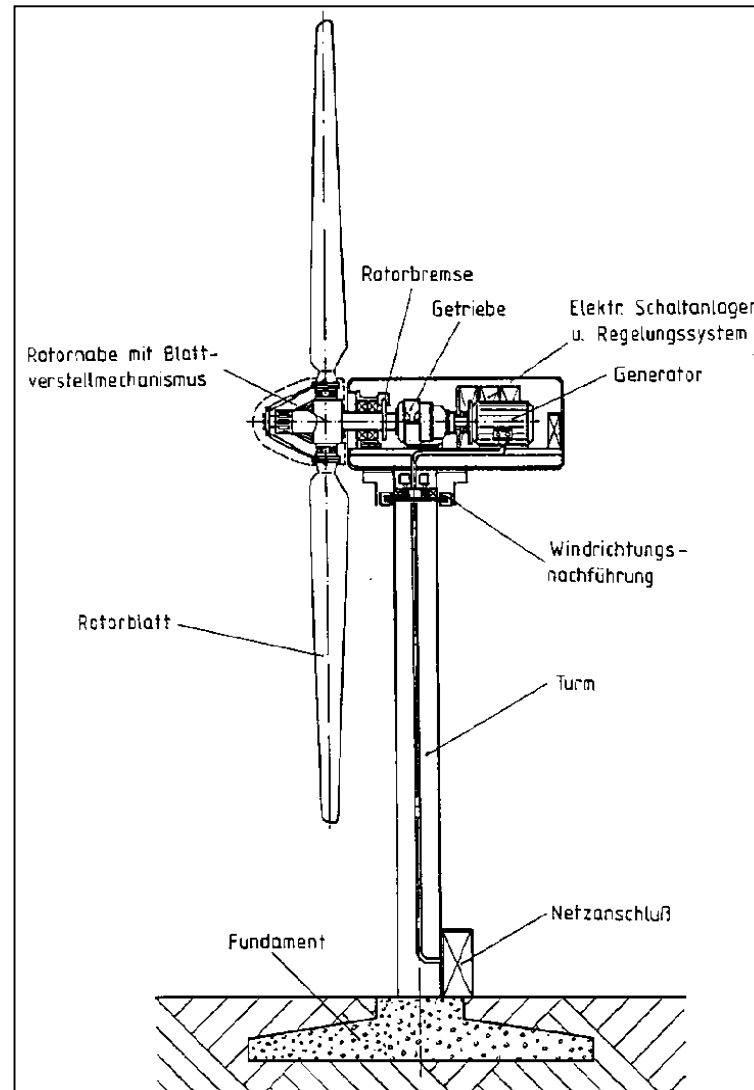
Traditio et Innovatio

Windkraftanlagen, Beispiel

Horizontalachsen- Windkraftanlage Typ Bonus,

Rotordurchmesser 37 m,
Nennleistung 450 kW

Quelle: Windkraftanlagen, Erich
Hau, Springer-Verlag



- Rotor
- Nabe
- Generator
- Blattverstellmechanismus
- Getriebe
- Lager
- Bremse
- Windrichtungsnachführung
- Maschinenhaus
- Turm
- etc.

Aufgabe:

- Wandlung der Windenergie in mechanische Energie

Aufbau:

- 1 bis n Flügel
- Nutzung von Tragflügelprofilen (NACA-, Göttinger-, spezielle Profile)
- i.d.R. Fertigung aus zwei Halbschalen mit Verwendung glaser- oder kohlefaserverstärkter Composit-Werkstoffe

Aufgabe:

- Aufnahme der Flügel

Aufbau:

- starr
- pendelnd
- gelenkig
- jeweils mit oder ohne Blattwinkelverstellung

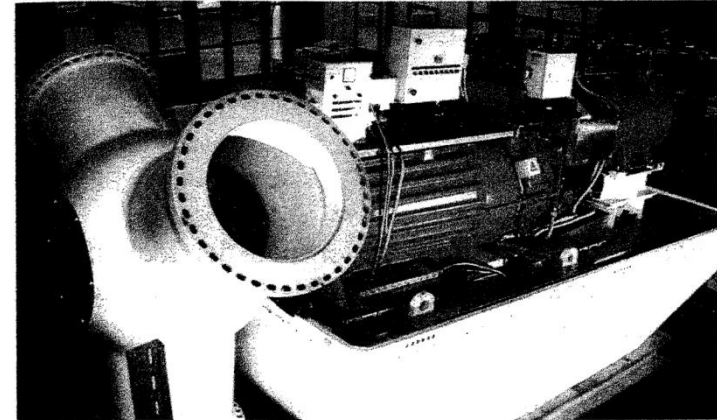


Bild 3-15 Starre Nabe eines Dreiblattrotors (Foto von Fa. Zollern)

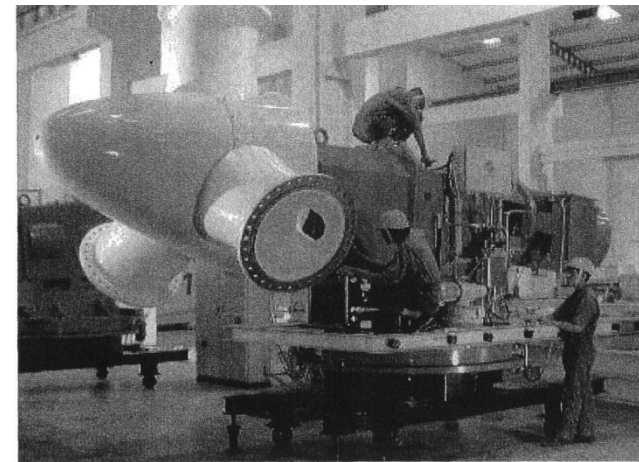


Bild 3-23 350 kW-Anlage in integrierter Triebstrangbauweise mit starrer Nabe (Fa. Suzlon)

Bilder entnommen aus Gasch,R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

- (synchrone) Verdrehung der Flügel zur Regelung der Turbine und zur Notabschaltung

Aufbau:

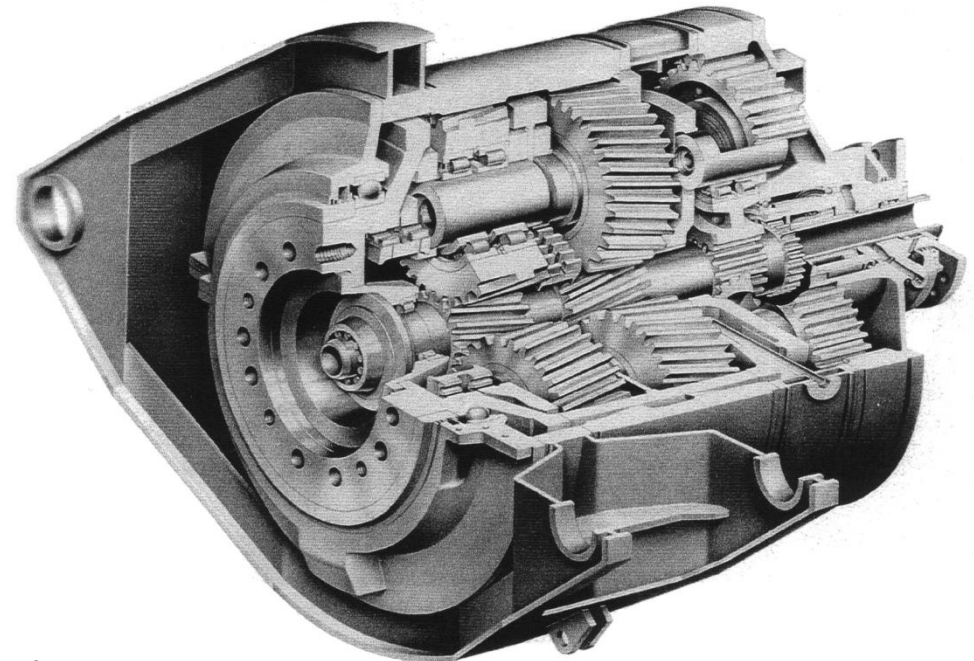
- elektrischer Antrieb oder
- hydraulischer Antrieb
- mechanische Verstellung durch Fliehgewichte

Aufgabe:

- Anpassung der Drehzahl des Rotors und der des Generators bzw. der folgenden Arbeitsmaschine

Ausführung:

- Zahnradgetriebe (Stirnrad- oder Planetengetriebe)
- andere Lösungen, z.B. Strömungskupplungen



Dreistufiges Planetengetriebe der Leistungsklasse 2 bis 3 MW (Bauart Thyssen);
Bild entnommen aus Hau, E. „Windkraftanlagen“

Aufgabe:

- Lagerung der Rotorwelle

Ausführung:

- Pendelrollenlager oder Zylinderrollenlager als separate Lager
- Dreipunkt-Lagerung (Integration des hinteren Lagers in das Getriebe)
- Lager komplett in Getriebe integriert
- andere Lösungen

Aufgabe:

- Halten des Rotors im Stillstand
- Anhalten des Rotors im Notfall
- zweites, aerodynamisches Brems-system ist vorgeschrieben!

Ausführung:

- Nutzung von Scheibenbremsen
- zweites Bremssystem:
Verdrehung des gesamten Flügels
oder nur der Flügelspitzen

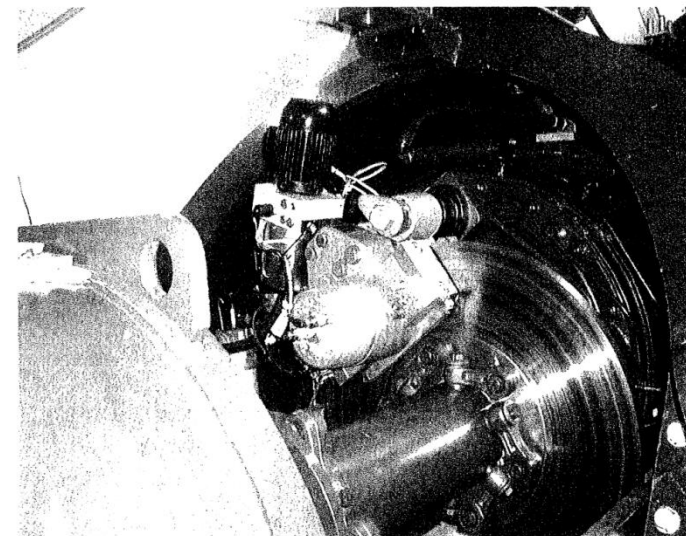


Bild 3-45 Scheibenbremse an der schnellen Welle eines Getriebes (Fa. Svenborg)

Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

- Drehen der Turbine in Windrichtung

Ausführung:

- z.B. mit Azimutmotoren
- Windfahnen bei kleinen Turbinen

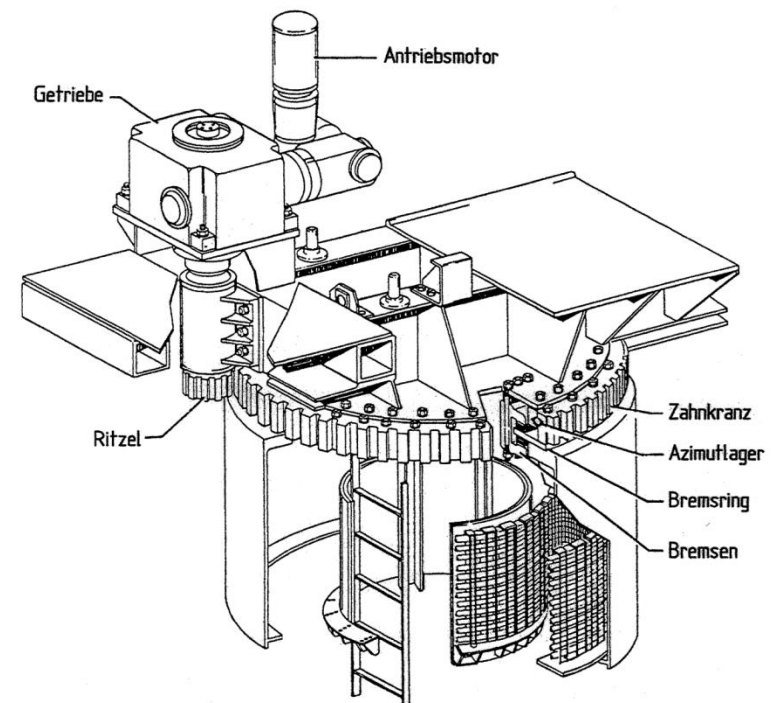


Bild 8.60: Windrichtungsnachführung mit Wälzlagerung und elektrischem Stellantrieb der Westinghouse WTG-0600 [18]

Tafelbild: Geschwindigkeitsdreieck am Profil

Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

- Aufnahme verschiedener Komponenten

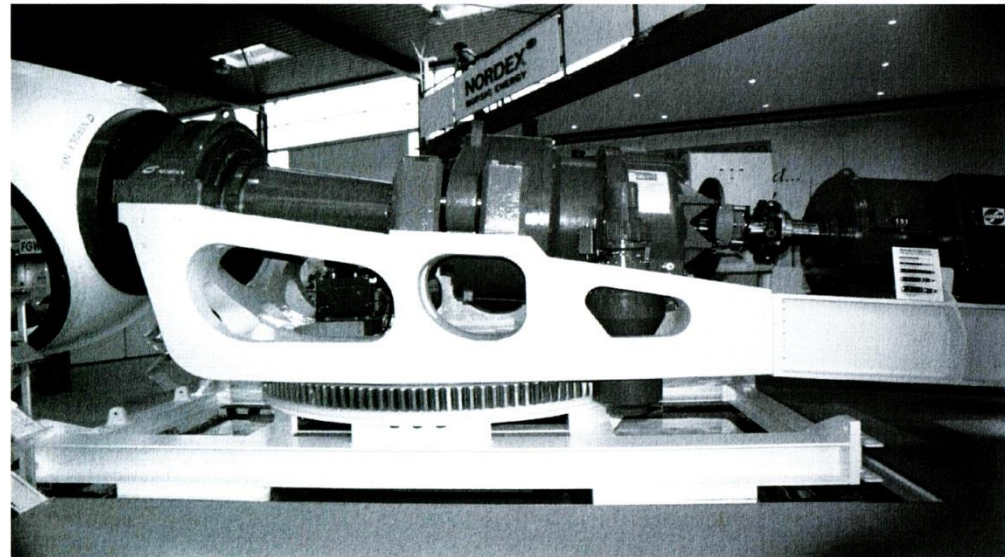


Bild 8.54: Gegossener Maschinenträger der Nordex N-80 (Material GG-6, Gewicht ca. 19 t) mit angeflanschem Generatorträger

Aufgabe:

- Aufnahme von Gondel und Rotor

Ausführungen:

- freitragende Türme (zylindrisch, konisch, Gittertürme) aus Stahl, Beton oder Werkstoffverbünden
- abgespannte Maste bei kleinen Anlagen

- aufgelöste Bauform
alle Komponenten sind einzeln auf dem Maschinenträger
untergebracht

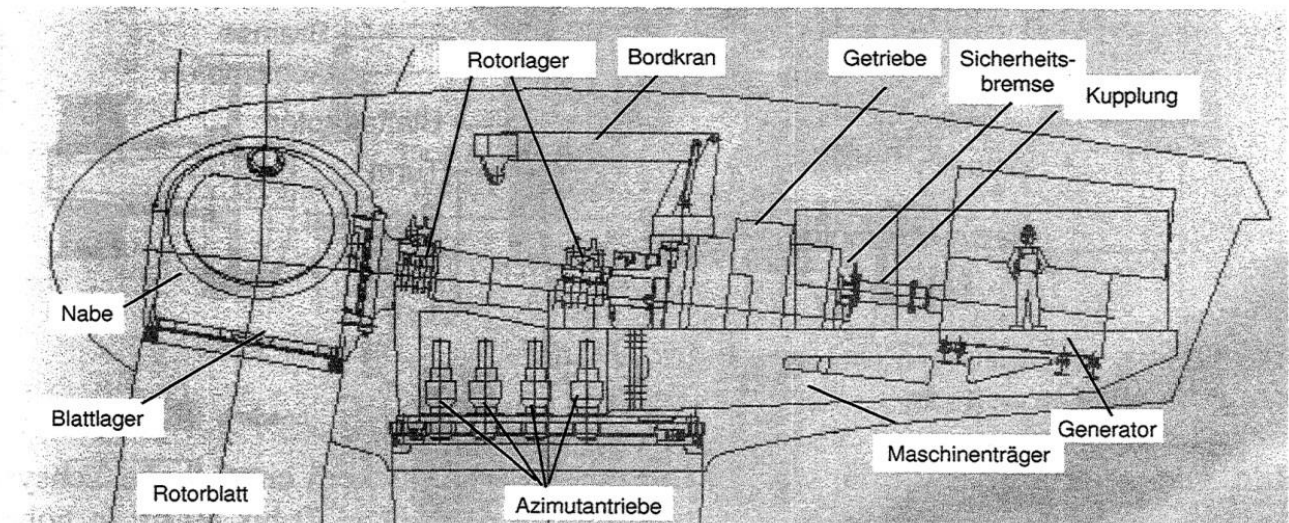


Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

- teilintegrierte Bauform
z.B. Integration des hinteren Lagers in das Getriebe

- integrierte Bauform

Rotorlager, Getriebe und Generator sind zu einem Block
zusammengefasst

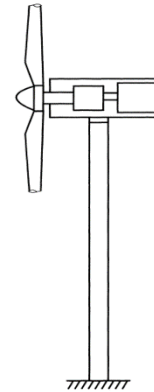
Aufgabe:

- Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie

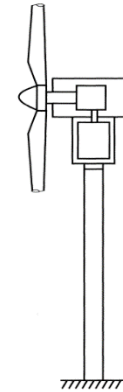
Ausführung:

- Synchrongeneratoren
- Asynchrongeneratoren

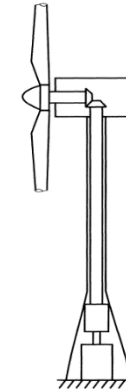
Möglichkeiten der Generatoranordnung



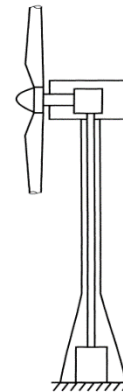
Getriebe und Generator
im Maschinenhaus
(Standardbauweise)



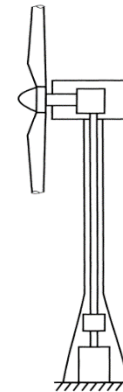
Generator senkrecht
im Turmkopf



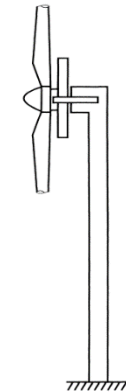
Getriebe und Generator
im Turmfuß



Getriebe im Turmkopf
Generator im Turmfuß



Generator im Turmfuß
Aufteilung des Getriebes



Direkt vom Rotor
angetriebener Generator
ohne Getriebe

Bild entnommen aus Hau, E.: Windkraftanlagen

Bild 8.1: Grundsätzliche Möglichkeiten der räumlichen Anordnung des Triebstrangs einer Windkraftanlage