

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Windturbinen und alternative Energiequellen WS 2015/16

Energieinhalt des Windes und Aufbau von Windkraftanlagen

Prof. Dr. 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)



studentische Vorträge

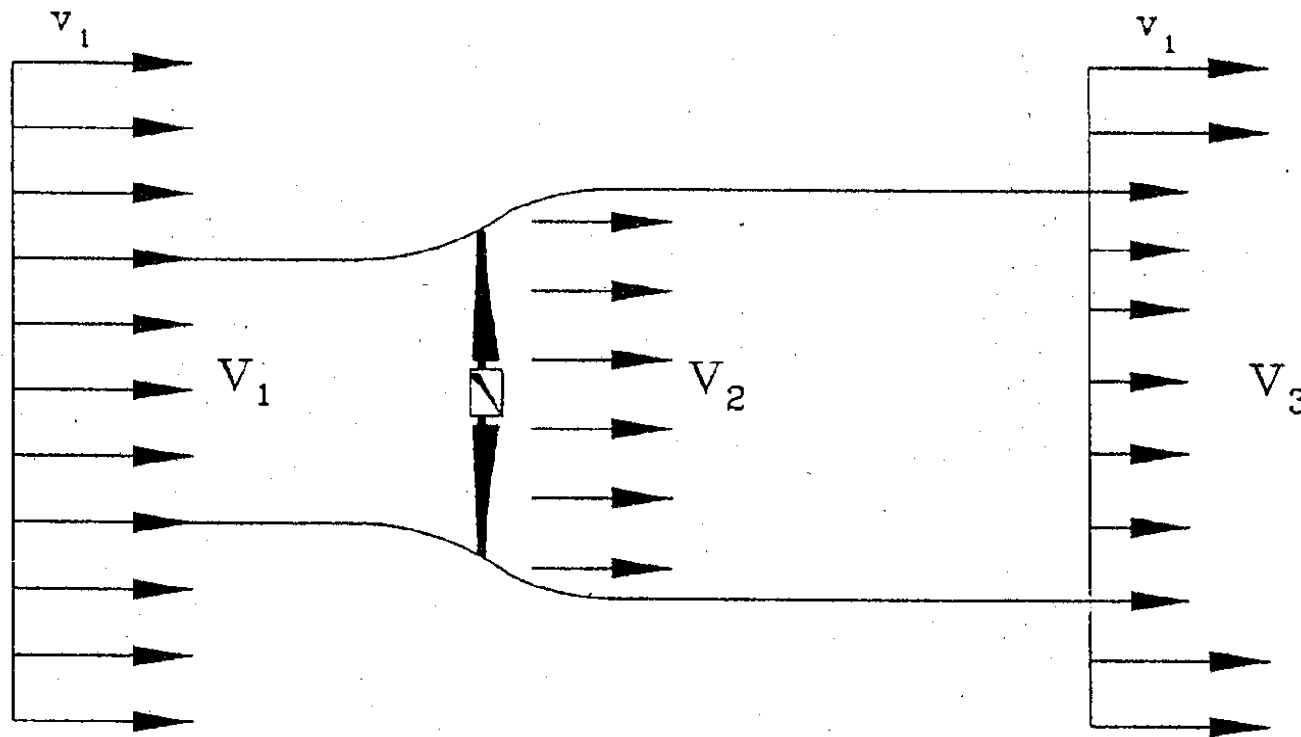
- LES
- Kleinwindkraftanlagen
- Modellierung von Parkeffekten
- Anforderungen an Installationsschiffe

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

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

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

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

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

$$P_{entzogen} = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot (c_1^2 - c_3^2) \cdot (c_1 + c_3) \quad (9)$$

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

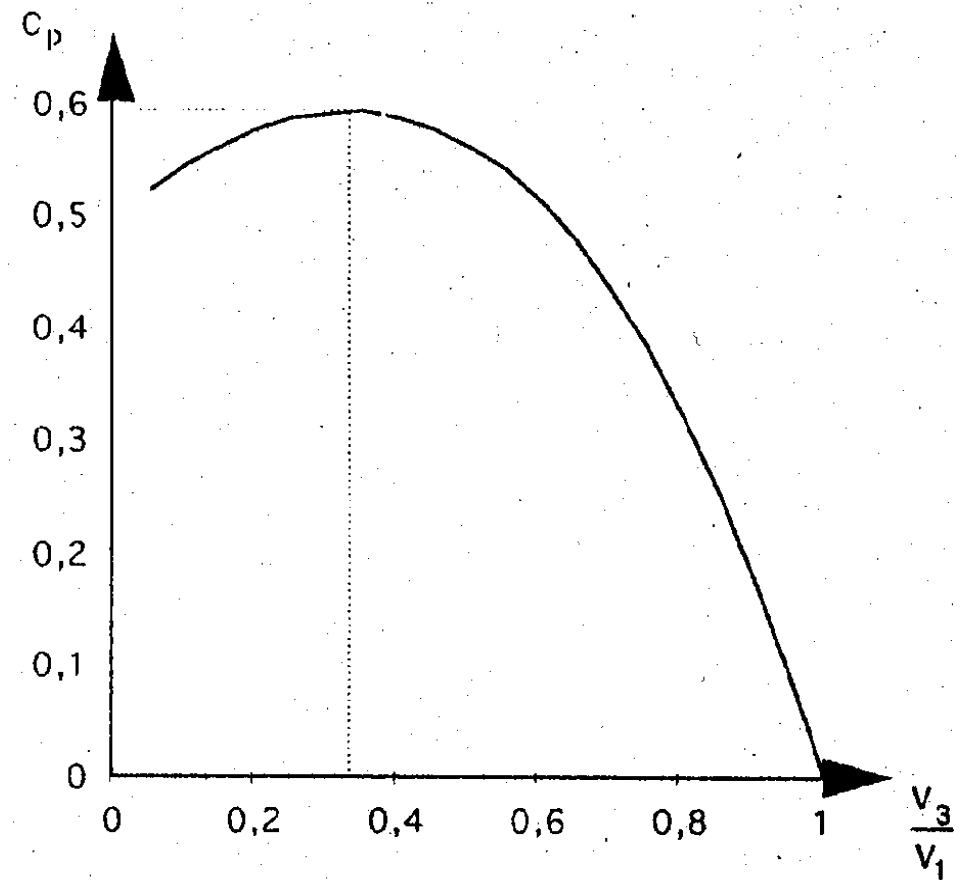
$$c_P = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{c_3}{c_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{c_3}{c_1} \right)$$

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

es ergibt sich:

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

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



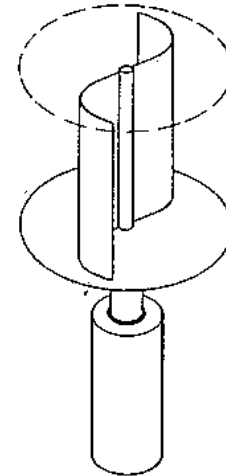
Leistungsbeiwert c_p in Abhängigkeit von dem Verhältnis Windgeschwindigkeit c_3 hinter dem Windrad zur Windgeschwindigkeit c_1 vor dem Windrad

Quelle: Gasch, R. : Windkraftanlagen

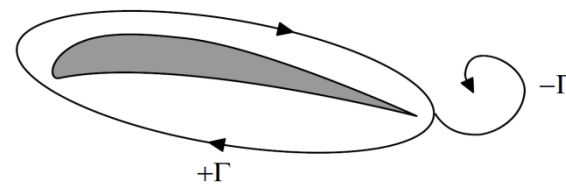


- durch den Widerstand eines Körpers
- durch den Auftrieb eines Körpers

► Widerstandsläufer



► Auftriebsläufer (mit vertikaler oder horizontaler Achse)



Aufbau von Windkraftanlagen und Funktion der einzelnen Bauteile

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

wesentliche Komponenten



- 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

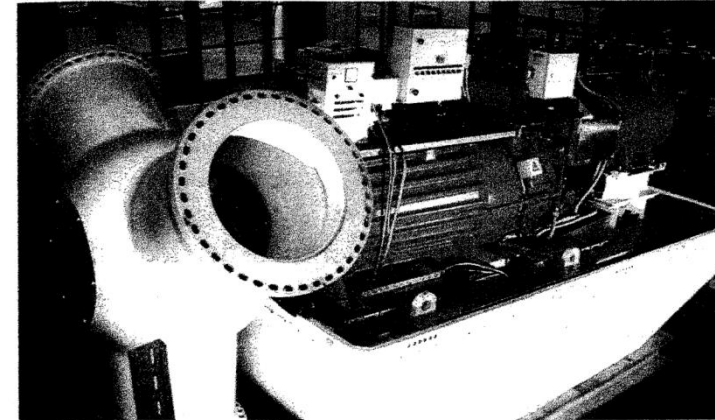


Bild 3-15 Starre Nabe eines Dreiblattrotors (Foto von Fa. Zollern)

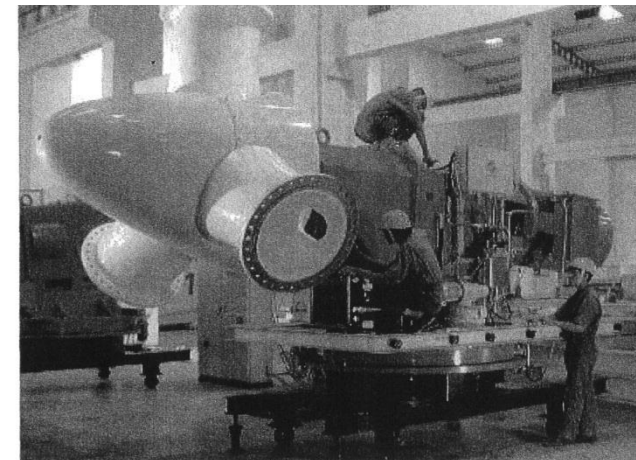


Bild 3-23 350 kW-Anlage in integrierter Triebstrangbauweise mit starrer Nabe (Fa. Suzlon)

Bilder entnommen aus Gasch,R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

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

Aufbau:

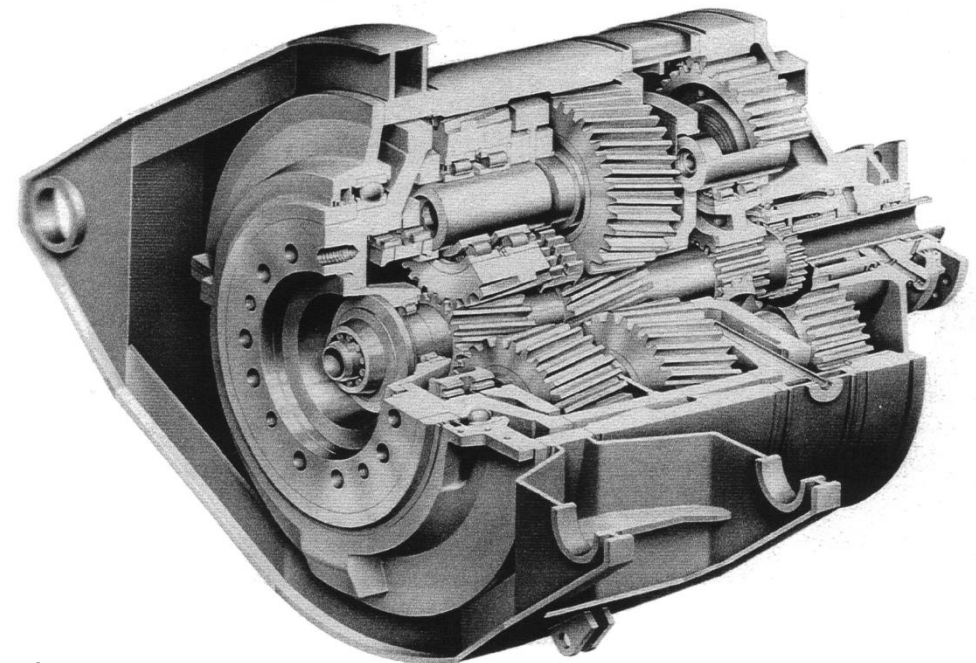
- elektrischer Antrieb oder
- hydraulischer Antrieb
- mechanische Verstellung durch Fliehgewichte

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

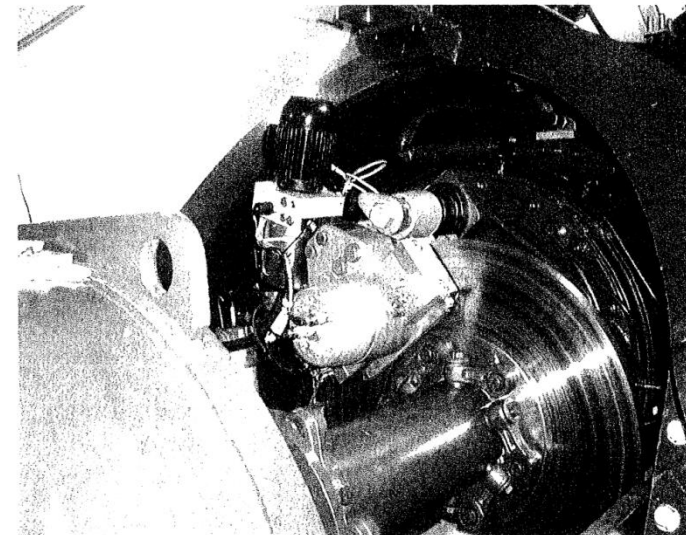


Bild 3-45 Scheibenbremse an der schnellen Welle eines Getriebes (Fa. Svenborg)

Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

- Drehen der Turbine in Windrichtung

Ausführung:

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

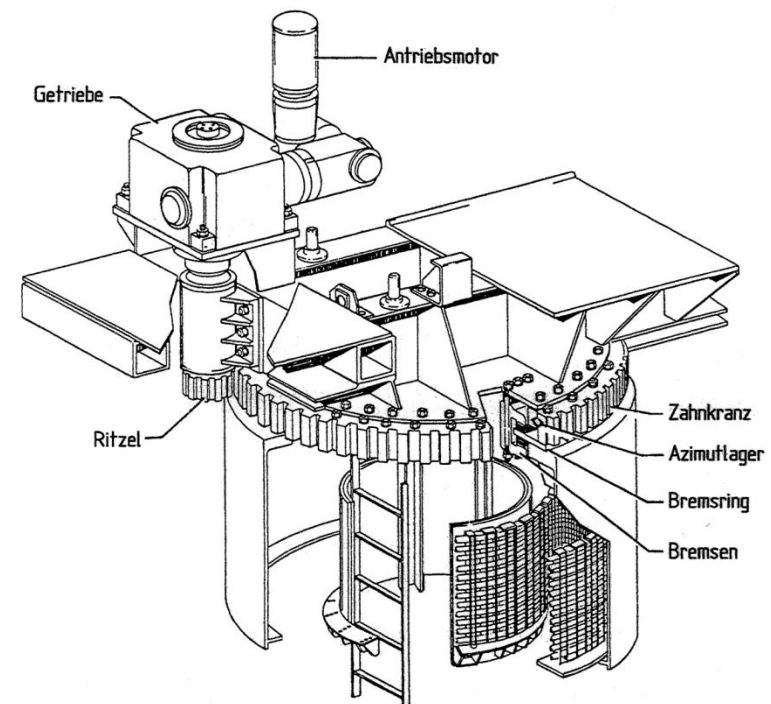


Bild 8.60: Windrichtungsnachführung mit Wälzlagerung und elektrischem Stellantrieb der Westinghouse WTG-0600 [18]

Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

Aufgabe:

- Aufnahme verschiedener Komponenten

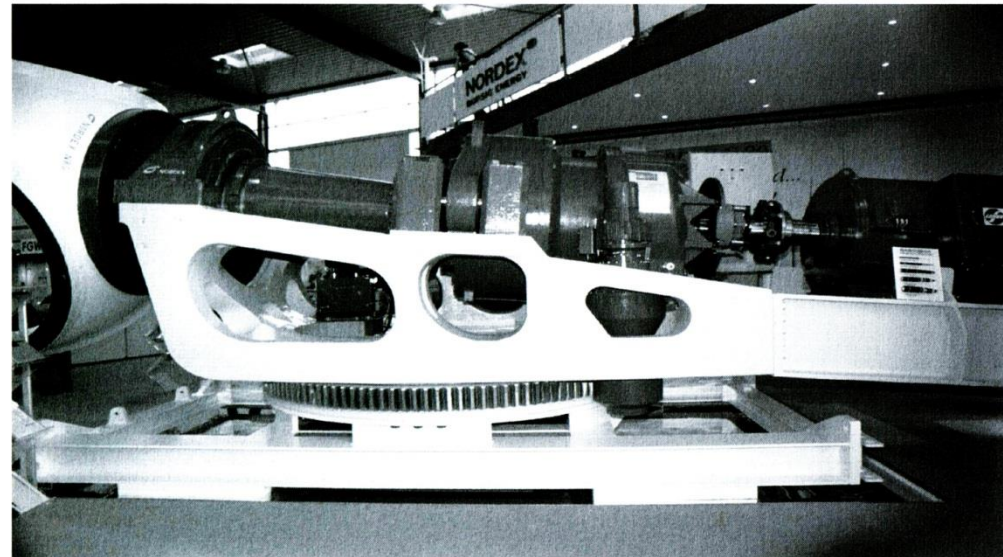


Bild 8.54: Gegossener Maschinenträger der Nordex N-80 (Material GG-6, Gewicht ca. 19 t) mit angeflanschem Generatorträger

Aufgabe:

- Aufnahme von Gondel und Rotor

Ausführungen:

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

- aufgelöste Bauform
alle Komponenten sind einzeln auf dem Maschinenträger
untergebracht

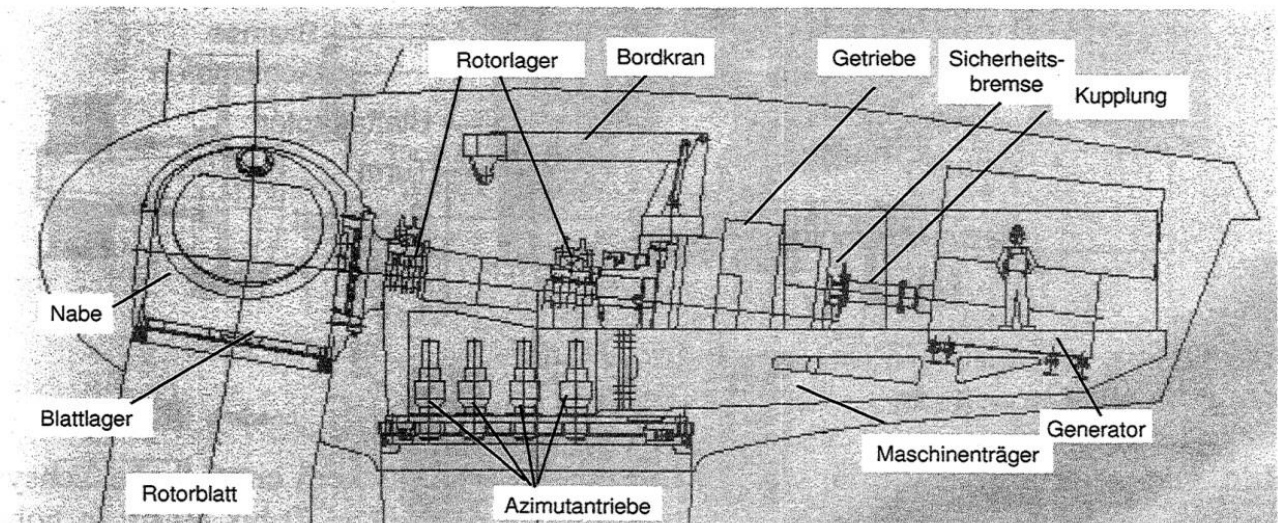


Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

Realisierungsmöglichkeiten des Triebstranges

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

- integrierte Bauform

Rotorlager, Getriebe und Generator sind zu einem Block
zusammengefasst

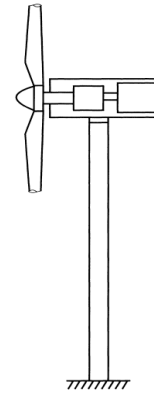
Aufgabe:

- Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie

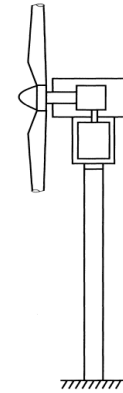
Ausführung:

- Synchrongeneratoren
- Asynchrongeneratoren

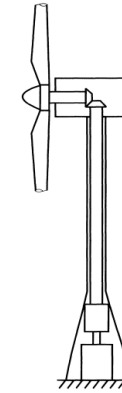
Möglichkeiten der Generatoranordnung



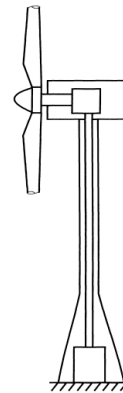
Getriebe und Generator im Maschinenhaus (Standardbauweise)



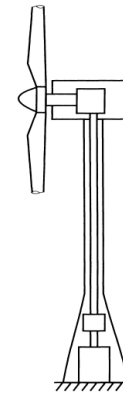
Generator senkrecht im Turmkopf



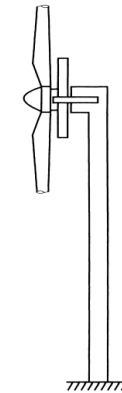
Getriebe und Generator im Turmfuß



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