

# Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

## 11. Windturbinen Einführung, Aufbau, Wind

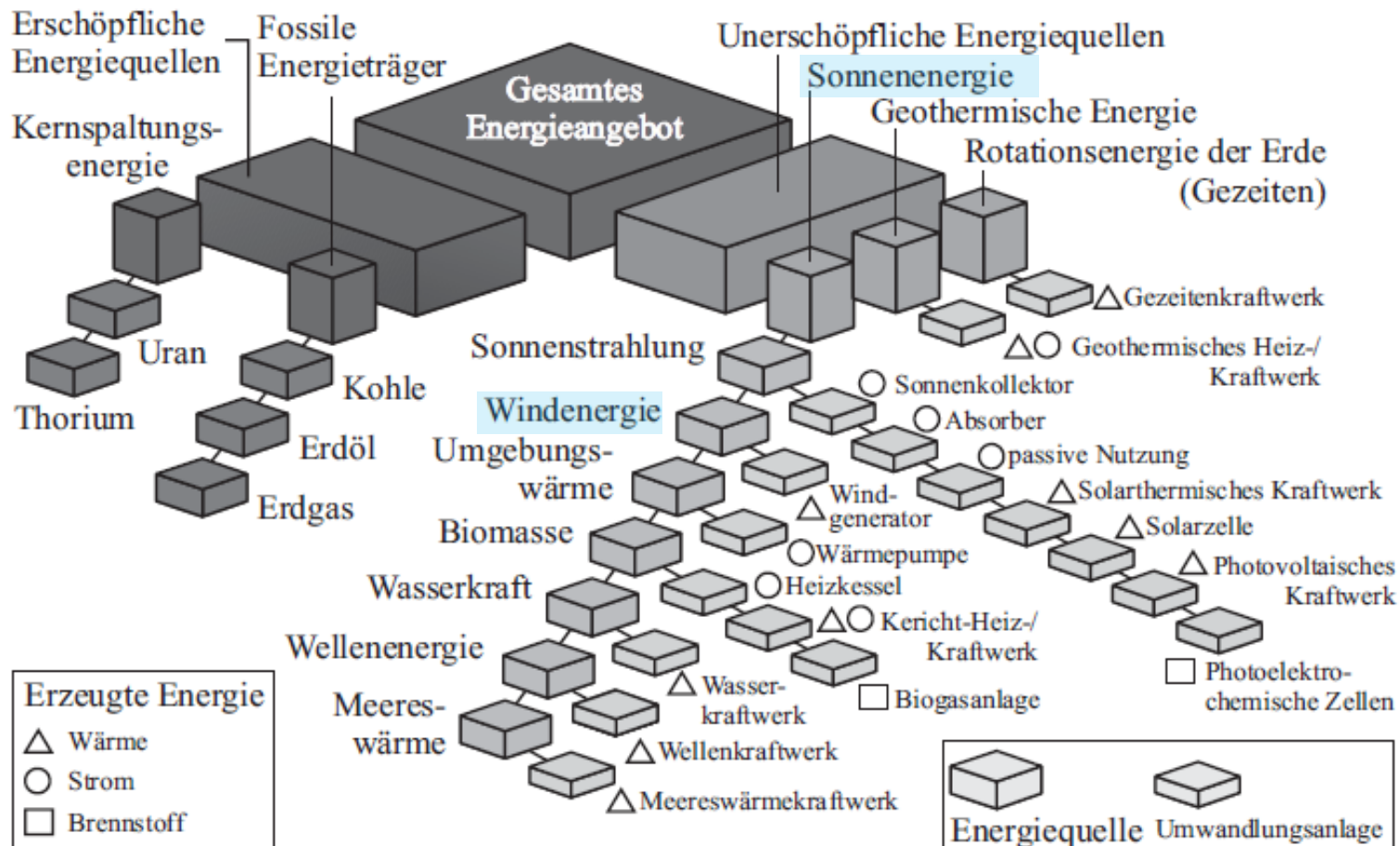
Lehrstuhl Strömungsmaschinen

# Gliederung der Vorlesung

1. Einführung, Einteilung, Historische Entwicklung, Aufbau und Wirkungsweise
2. Strömungsmechanische Grundlagen
3. Energieübertragung am Rotor, Ableitung der Euler'schen Turbomaschinengleichung
4. Ähnlichkeitsmechanik
5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte, Verluste
6. Kavitation
7. Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung
8. Pumpenbauarten, Sonderbauarten
9. Strömungswandler
10. Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbine, Wells-Turbine
11. Windturbinen – Einführung, Aufbau
12. Windturbinen – Entwurf
13. Dampfturbinen
14. Zusammenfassung

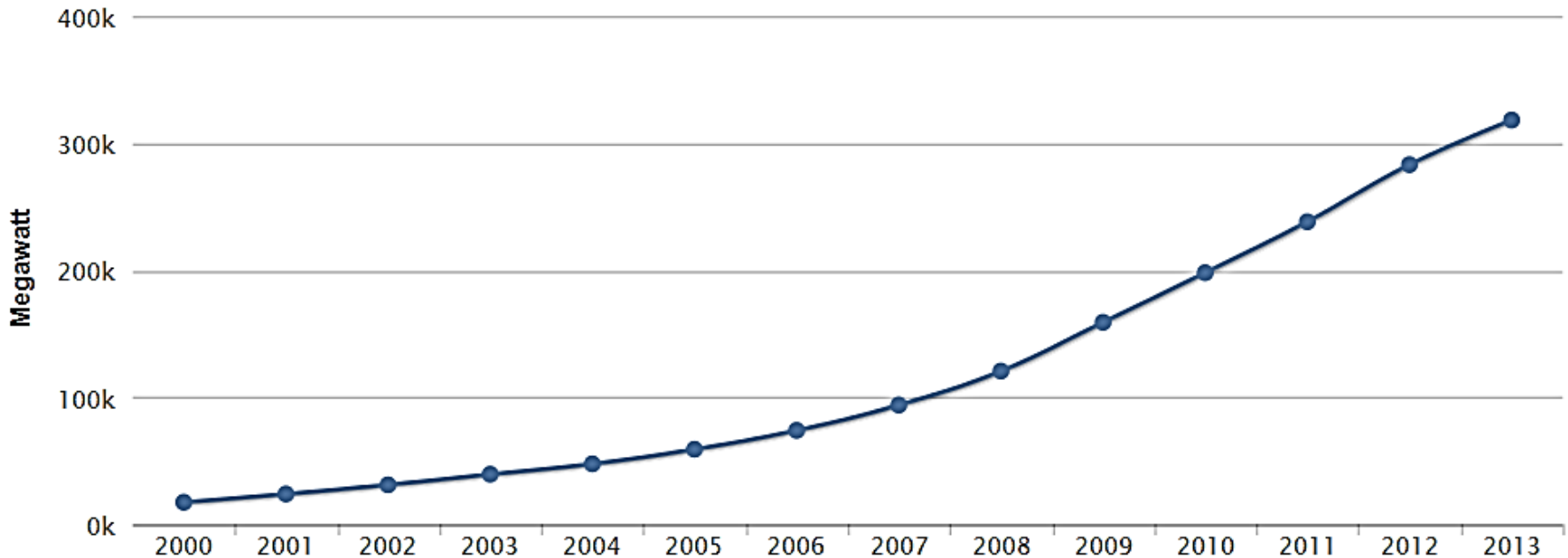
## 11.1 Windturbinen - Einführung

## Übersicht über die erschöpflichen und unerschöpflichen Energien



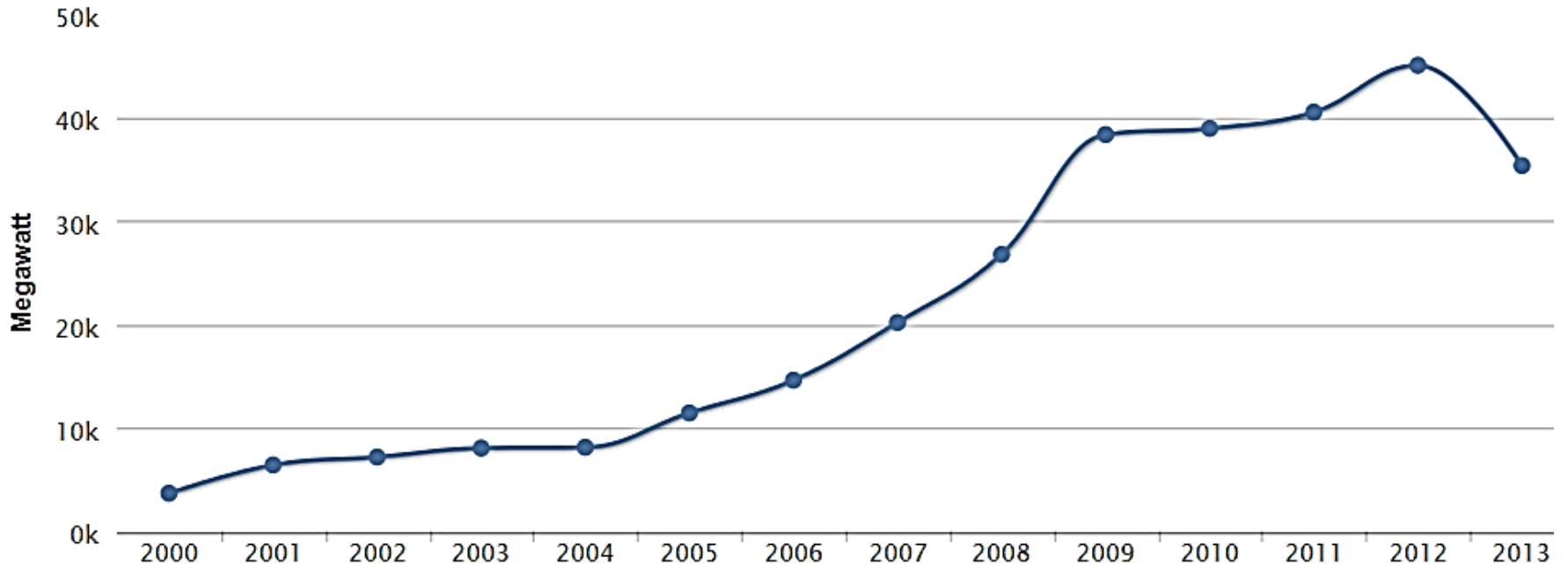
Giesecke, Mosonyi: Wasserkraftanlagen

## WEA: Entwicklung der installierten Leistung weltweit



Installierte Leistung aller Energieanlagen weltweit (2009): 3300 GW

## WEA: jährlicher Neubau weltweit



## Windenergienutzung weltweit nach Länder, Stand 2013

### Neuinstallation 2013

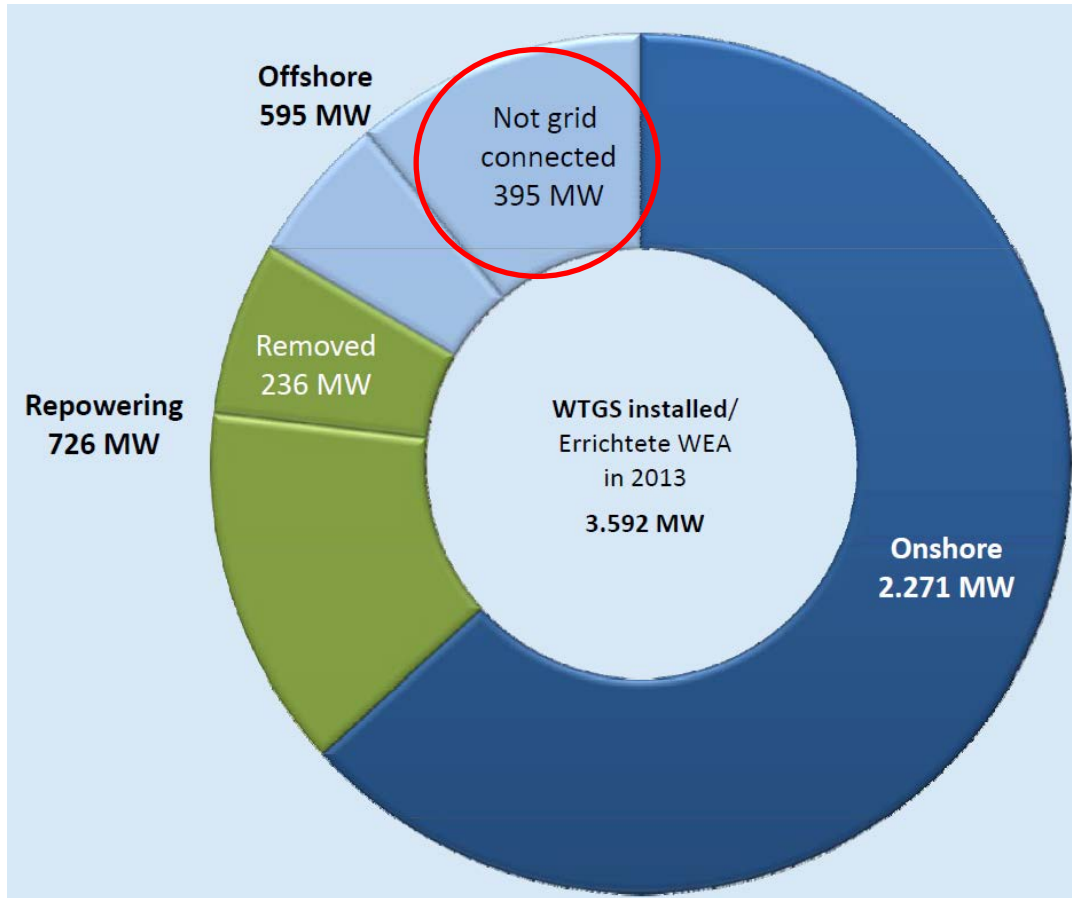
Country	MW	% Share
China **	16.100	44,9%
Germany *	3.592	10,0%
UK	1.883	5,3%
India	1.729	4,8%
Canada	1.599	4,5%
USA	1.084	3,0%
Brazil ***	948	2,6%
Poland	894	2,5%
Sweden	724	2,0%
Romania	695	1,9%
Rest of the World	6.573	18,3%
<b>Total TOP 10</b>	<b>29.248</b>	<b>81,7%</b>
<b>World Total</b>	<b>35.821</b>	

### Installierte Leistung Stand 2013

Country	MW
China **	91.424
USA	61.091
Germany *	34.660
Spain	22.959
India	20.150
UK	10.531
Italy	8.552
France	8.254
Canada	7.803
Denmark	4.772
Rest of the World	48.352
<b>Total TOP 10</b>	<b>270.196</b>
<b>World Total</b>	<b>318.548</b>

C. Ender; DEWI GmbH: Windenergienutzung in Deutschland - Stand 31.12.2013

## Windenergienutzung in Deutschland, Neuinstallation Stand 2013

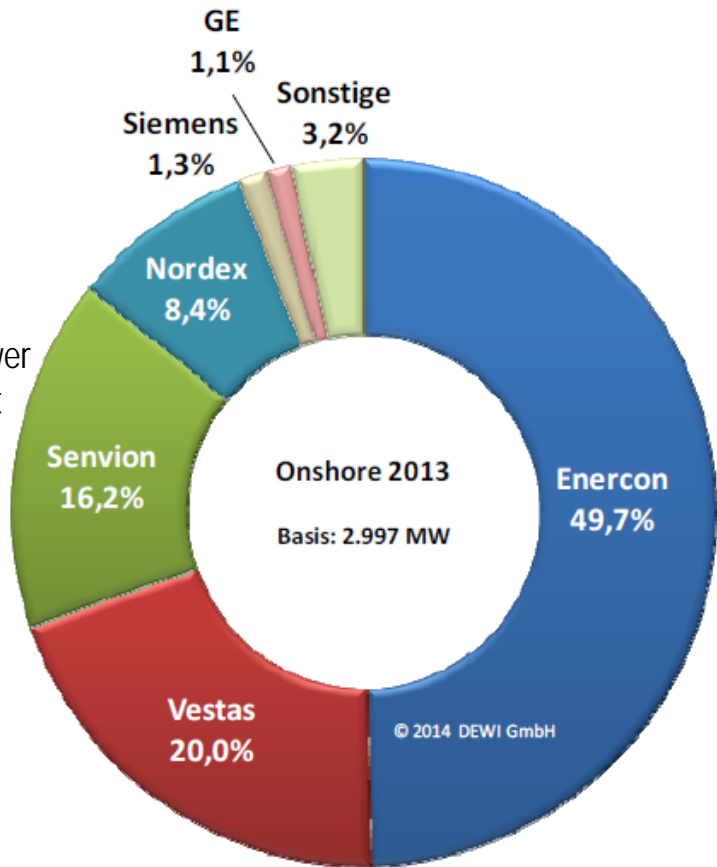


Repowering:  
256 WEA  $\rightarrow$   $\emptyset$  2,8 MW/WEA

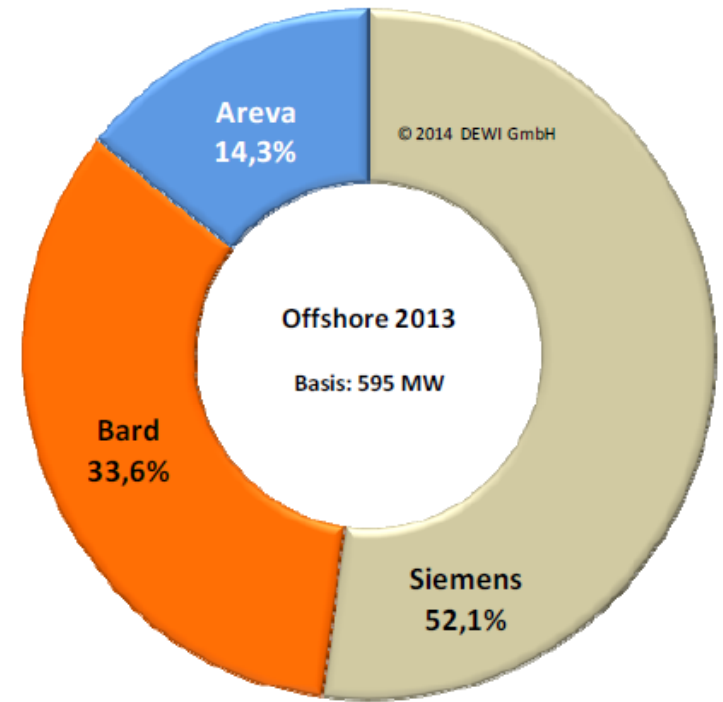
Abbau:  
373 WEA  $\rightarrow$   $\emptyset$  0,6 MW/WEA

Offshore – Neuinstallation  
143 WEA  $\rightarrow$   $\emptyset$  4,2 MW/WEA

## Anteile der Hersteller von WEA in Deutschland 2013 (Neuinstall.)



Nur Onshore



Nur Offshore

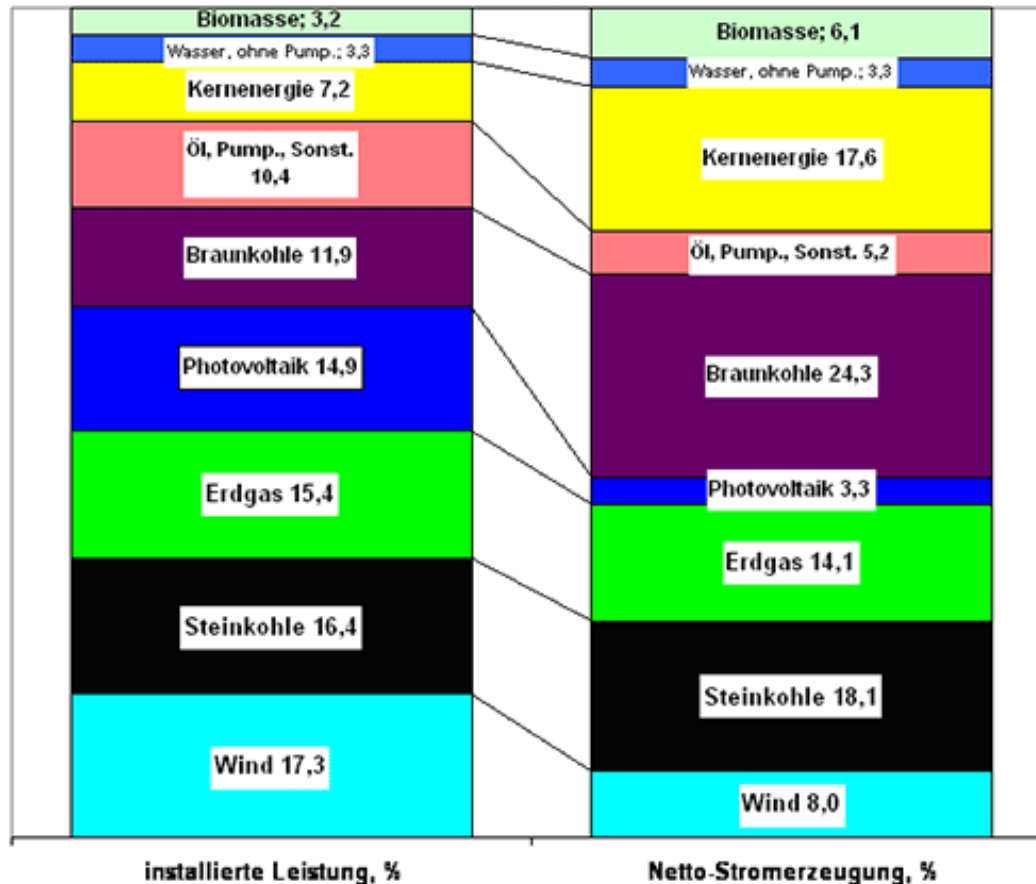
## Installierte Leistung (öffentliches Stromnetz) in Deutschland

Bruttostromerzeugungskapazität (in GW)<sup>[4]</sup>

Energieträger	2000	2009	2010	2011	2012	'00 - '12
Steinkohlen	32,3	29,0	30,2	30,2	29,8	-7,7%
Braunkohlen	21,8	22,4	22,7	24,9	24,2	+11,0%
Heizöl	7,5	5,2	5,9	6,4	4,2	-44,0%
Gase	22,3	23,1	23,8	23,9	26,4	+18,4%
Kernenergie	23,6	21,5	21,5	12,7	12,7	-46,2%
Wasser	9,0	10,3	10,4	10,6	10,4	+15,6%
Wind	6,1	25,8	27,2	29,1	31,3	>+100%
Photovoltaik	0,076	9,9	17,3	25,0	32,6	>+100%
Biomasse	0,5	4,3	4,8	5,3	6,2	>+100%
Sonstige	2,1	5,7	6,2	6,4	6,6	>+100%
Insgesamt	125,2	157,4	170,2	174,4	184,4	+47,3%

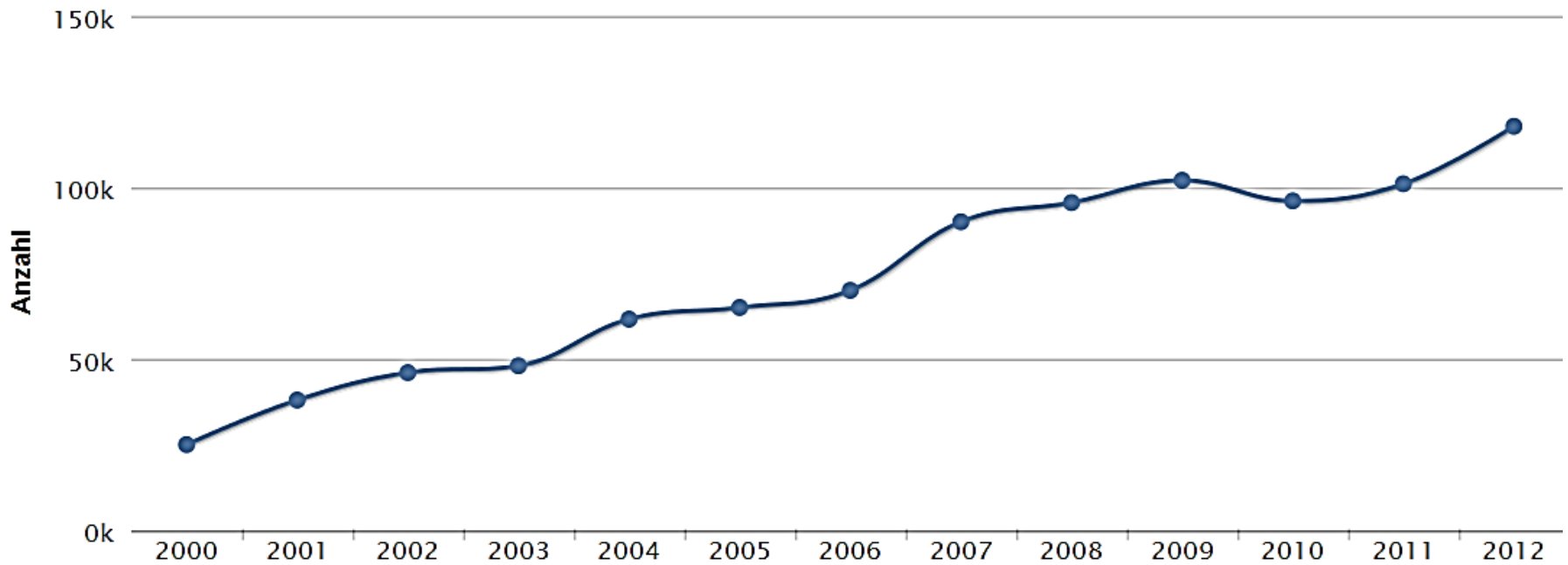
BMWi + Wikipedia: Installierte Leistung

## Installierte Leistung und Nettostromerzeugung in Deutschland 2011



[http://www.kernfragen.de/kernfragen/lexikon/k/kraftwerksleistung\\_in\\_der\\_bundesrepublik\\_deutschland.php](http://www.kernfragen.de/kernfragen/lexikon/k/kraftwerksleistung_in_der_bundesrepublik_deutschland.php)

## Beschäftigte in der Windindustrie in Deutschland



<http://www.wind-energie.de/infocenter>

# Einführung

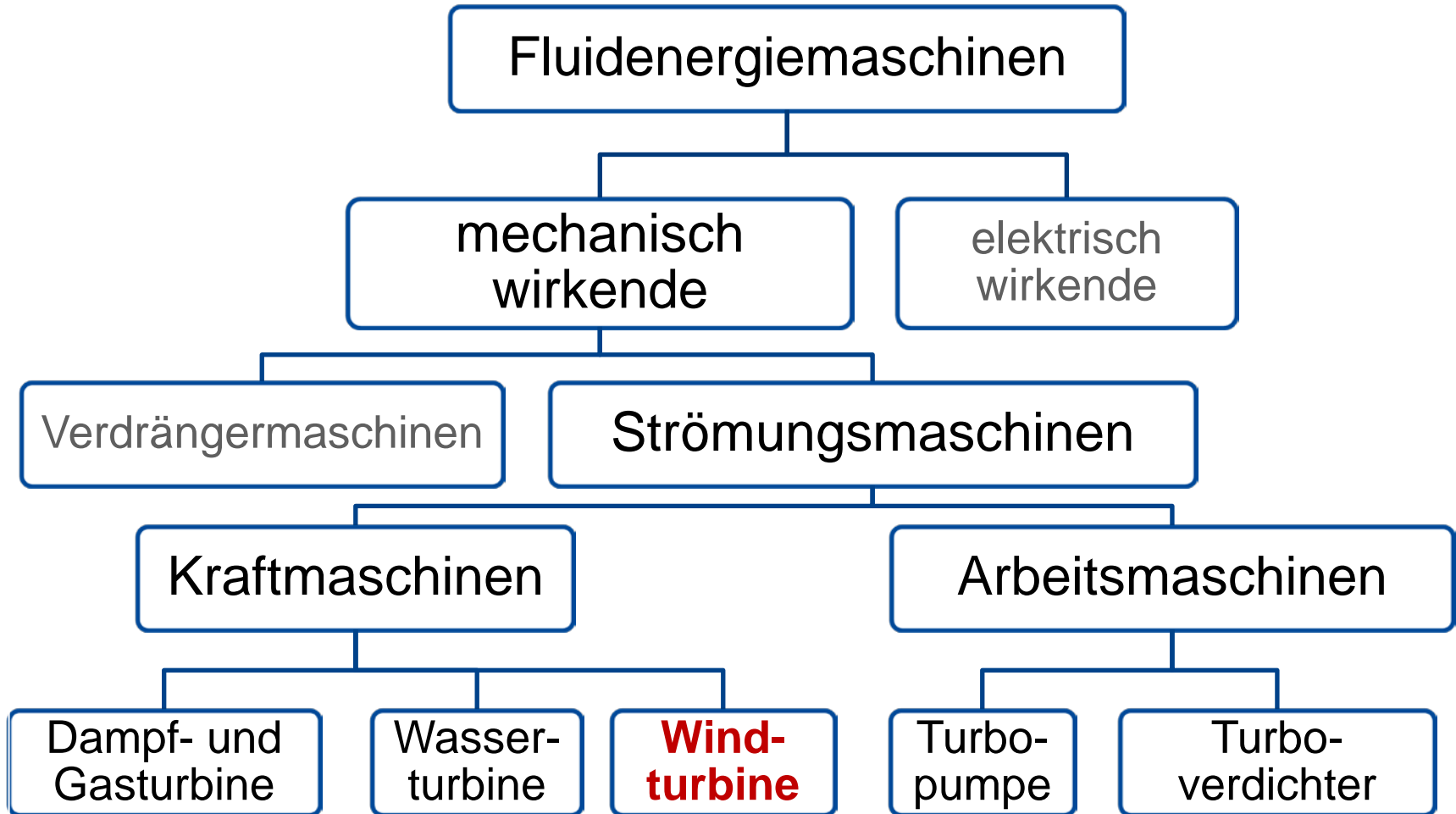
## Leistungssteigerung der Windkraftanlagen



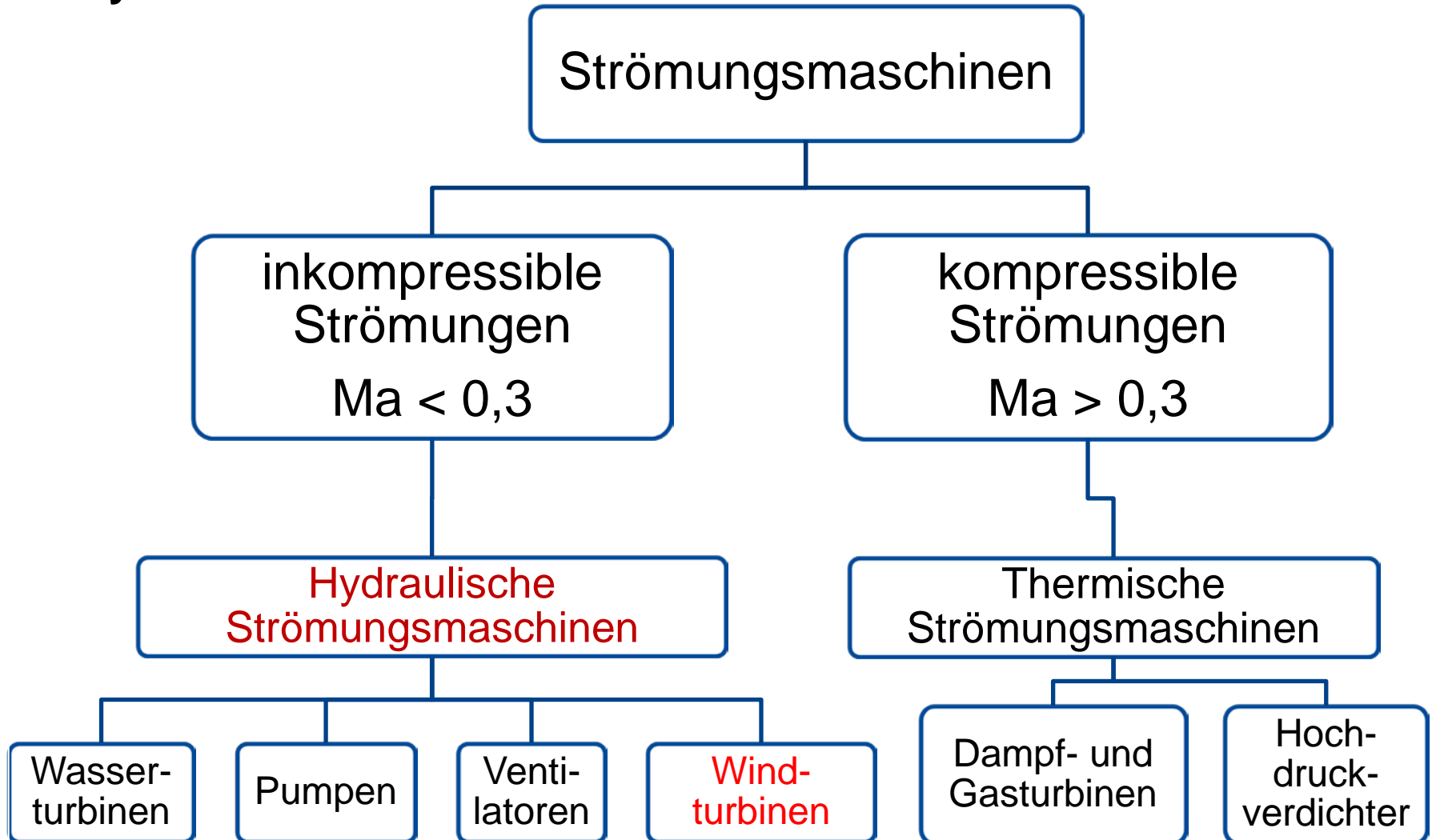
	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Nennleistung (in kW)	30	80	250	600	1.500	3.000	7.500
Rotordurchmesser (in m)	15	20	30	46	70	90	126
Überstrichene Rotorfläche (in m <sup>2</sup> )	177	314	707	1.662	3.848	6.362	12.469
Nabenhöhe (in m)	30	40	50	78	100	105	135
Jahresenergieertrag (in MWh)	35	95	400	1.250	3.500	6.900	ca. 20.000

Quelle: Statistik, BfE

## Systematik



## Systematik

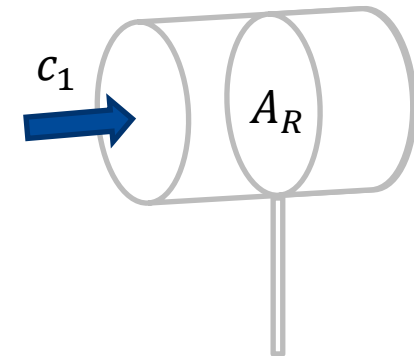


## 11.2 Die Physik der Windenergienutzung

## Windleistung

Windenergie: 
$$E_{kin} = \frac{1}{2} m c_1^2$$

Windleistung: 
$$P = \frac{1}{2} \dot{m} c_1^2$$

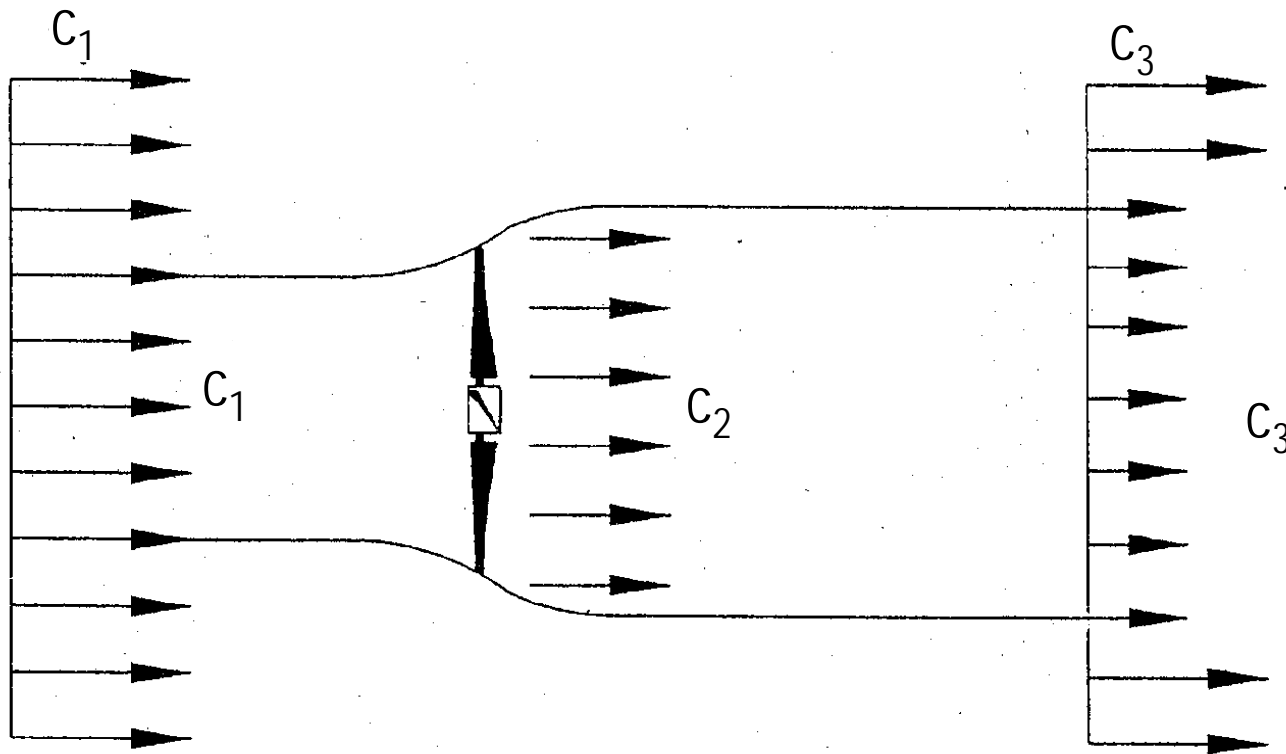


mit  $\dot{m} = \rho \cdot A_R \cdot c_1$  ( $A \perp c$ )  
Massenstrom durch Rotorebene,  
wenn nicht verzögert

folgt: 
$$P = \frac{1}{2} \rho A_R c_1^3$$

## Rotorleistung:

Durch Abbremsung der Luftmassen wird Windleistung in mechanische Energie des Windrotors umgewandelt.



Strömung durch ein stark idealisiertes Windrad nach Betz

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

# Die Physik der Windenergienutzung

Aus Massenkonservierung innerhalb der Stromröhre

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot c_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot c_2 = \rho_3 \cdot A_3 \cdot c_3$$

folgt eine Aufweitung der Stromröhre bei Verringerung der Windgeschwindigkeit .

## Rotorleistung

= dem Wind entzogene Leistung:

$$P_{entz} = P_R = \frac{1}{2} \dot{m} (c_1^2 - c_3^2)$$

Grenzfälle:

- $c_1 = c_3 \rightarrow P_{entz} = 0$
- $c_3 = 0 \rightarrow \dot{m} = 0 \rightarrow P_{entz} = 0$

↳ Es muss ein Optimum für die Abbremsung der Luftmassen geben.

## Rotorleistung

Betz fand heraus, dass die Energieentnahme am höchsten ist, wenn:

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

Die Geschwindigkeit in der Rotorebene ist dann:

$$c_2 = \frac{2}{3} c_1$$

## Rotorleistung

Im Fall der theoretisch maximalen Leistungsaufnahme nach Betz beträgt der Ertrag:

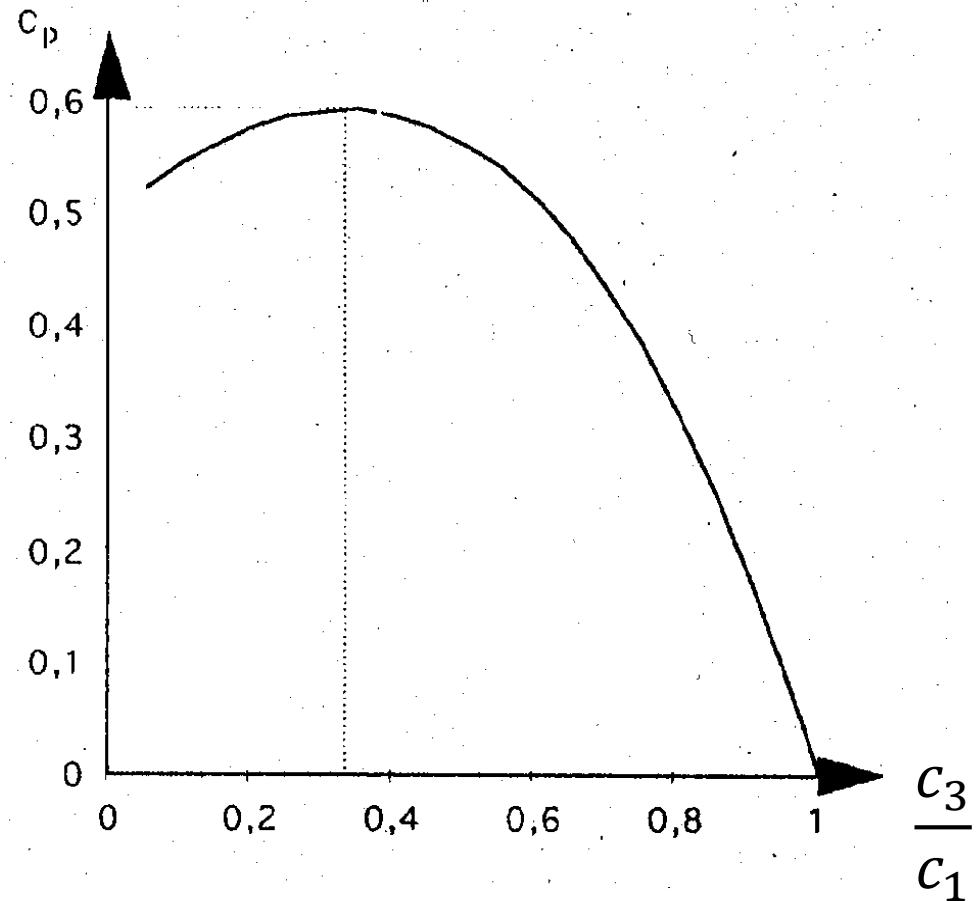
$$P_R = c_{p,Betz} \cdot P = c_{p,Betz} \frac{1}{2} \rho_W A_R c^3$$

mit:  $c_{p,Betz} = \frac{16}{27} = 0,59$       Leistungsbeiwert nach Betz

## Leistungsbeiwert $c_p$

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

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



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

# Die Physik der Windenergienutzung

## Leistungsbeiwert $c_p$

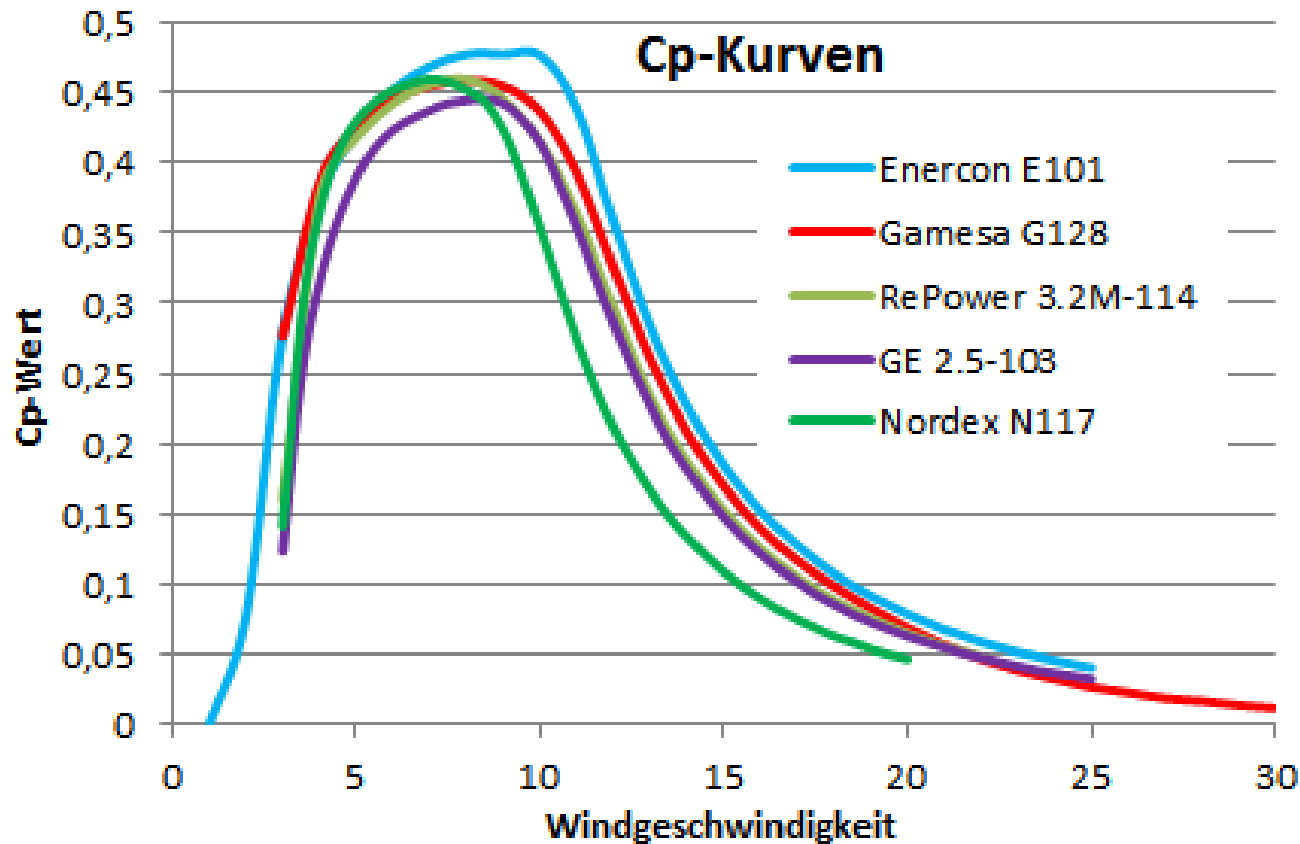
Annahmen von Betz:

- Verlustlose Leistungsentnahme
- Homogene Anströmung
- Verzögerung in einer Druckscheibe von  $c_1$  auf  $c_3$

Praktische Leistungsbeiwerte:

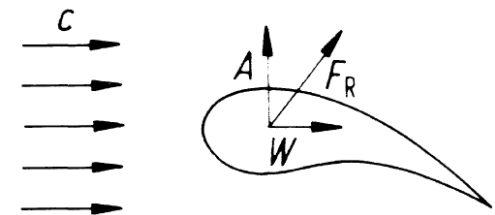
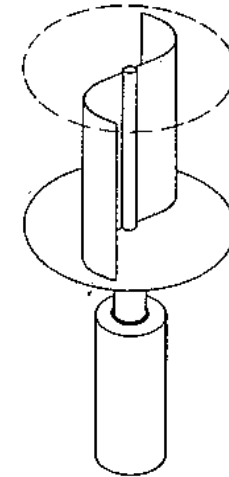
- Widerstandsläufer:  $c_p < 0,2$
- Auftriebsläufer:  $c_p$  bis 0,5

## Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit



## Nutzung der Windenergie

- Nutzung des Widerstandes eines umströmten Körpers → **Widerstandsläufer**
  
- Nutzung des Auftriebs eines umströmten Körpers → **Auftriebsläufer**



$A$  = Auftriebskraft  
 $W$  = Widerstandskraft  
 $F_R$  = Result. Fluidkraft

[Fister, W.: Fluidenergiermaschinen, Band 1]

## 11.3 Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen

## Typologie und typische Anwendungen

Schnellaufzahl  $\lambda = \frac{u_{max}}{c_1}$

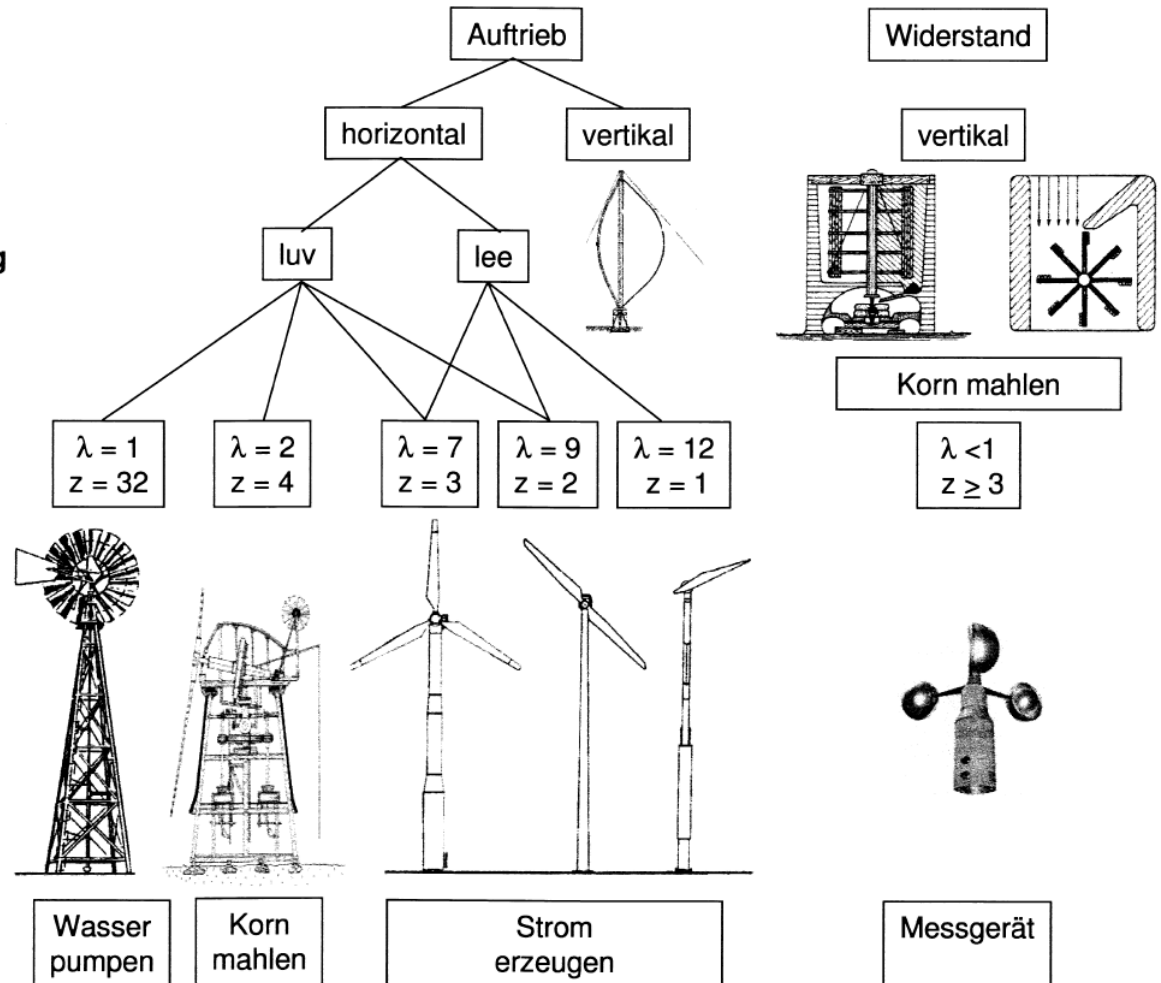
Prinzip

Achse

Orientierung

Rotor

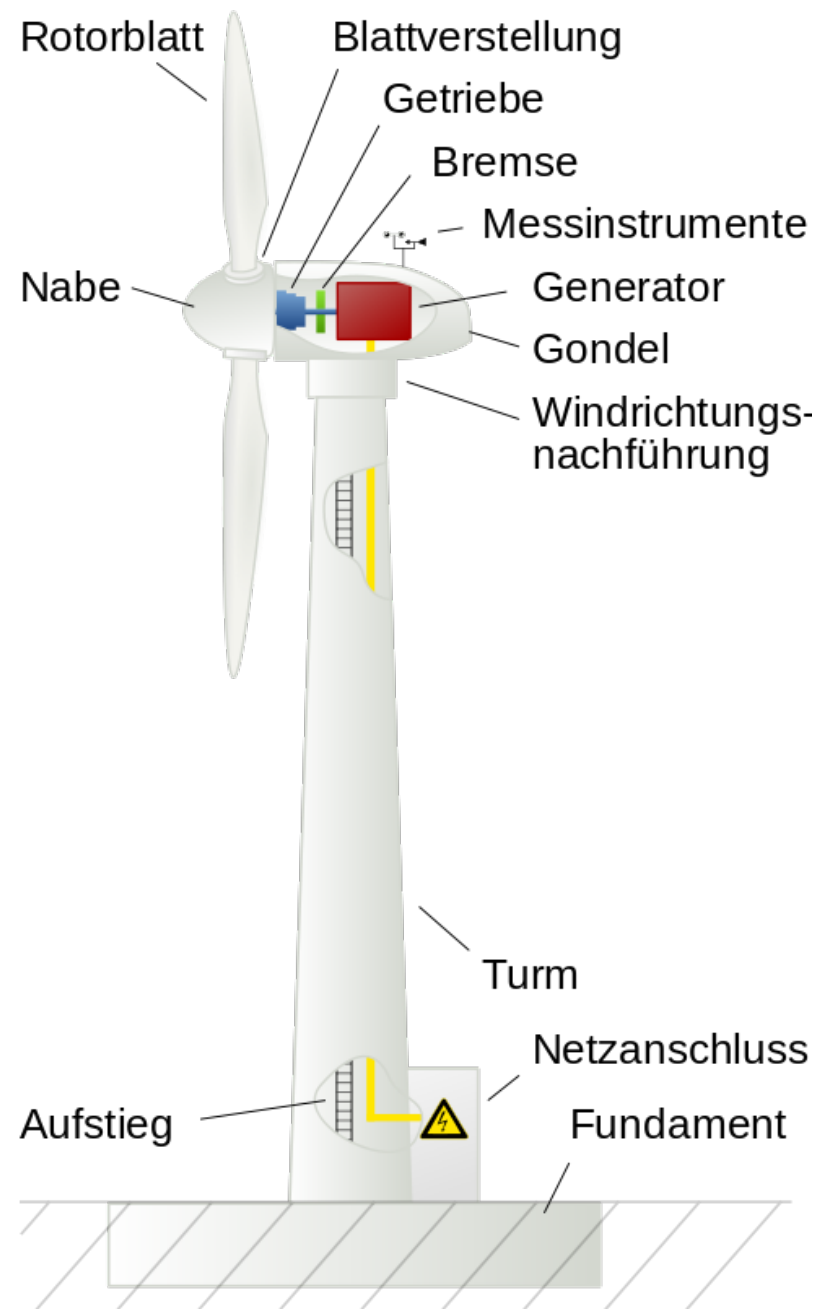
Anwendung



# Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen

Beispiel

Horizontalachsen-WEA

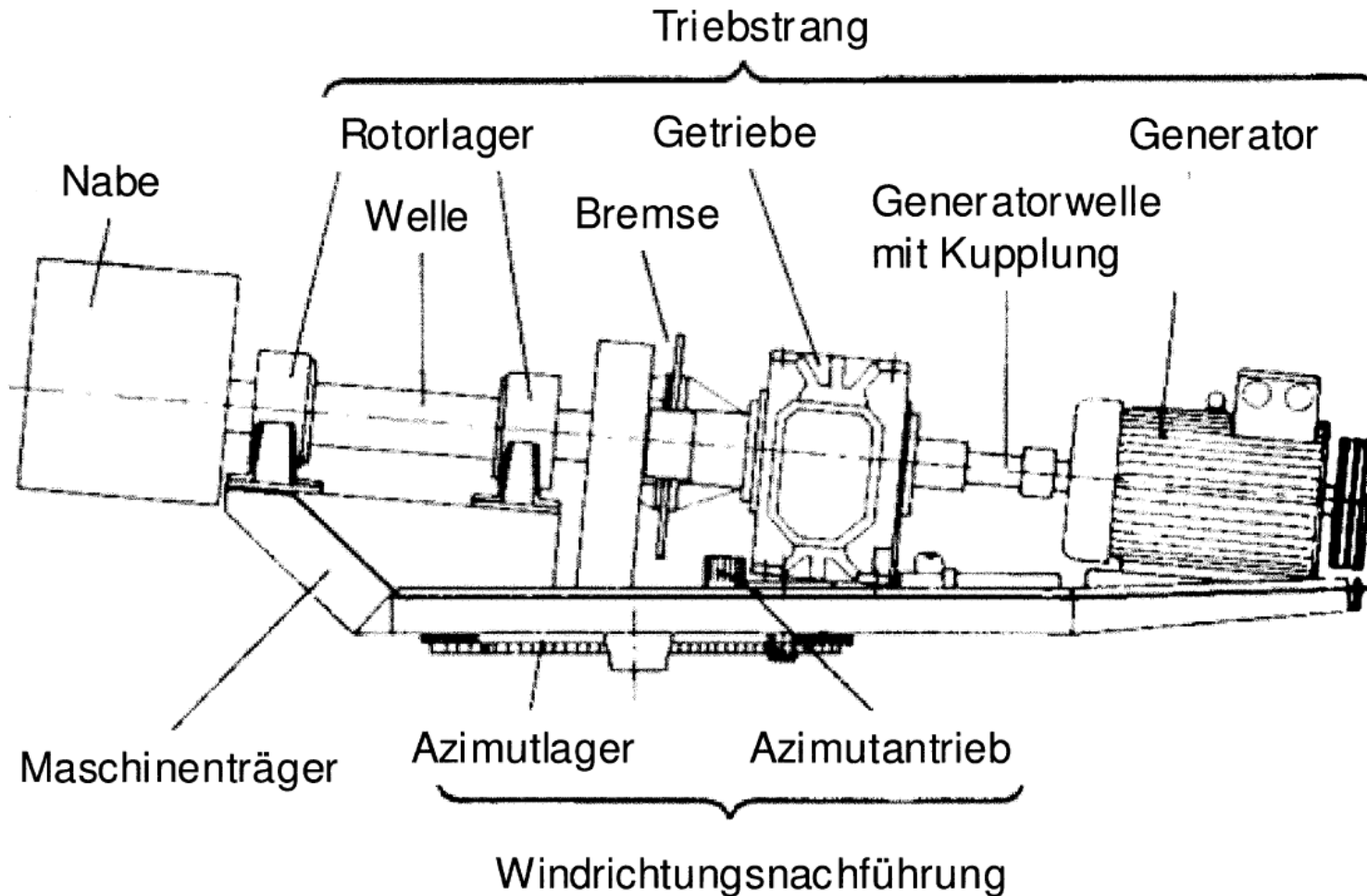


Quelle: A. Nordmann, Wikipedia

## wesentliche Bestandteile

- Rotor
  - Rotorblätter
  - Nabe
  - aerodynamische Bremse
- Triebstrang
  - Rotorwelle
  - Getriebe
  - Lager
  - Bremse
  - Generator
- Windrichtungsnachführung
- Turm
- Fundament
- elektrische Komponenten
  - Steuerung
  - Netzanschluss

## Maschinenträger



Gasch, R.: Windkraftanlagen

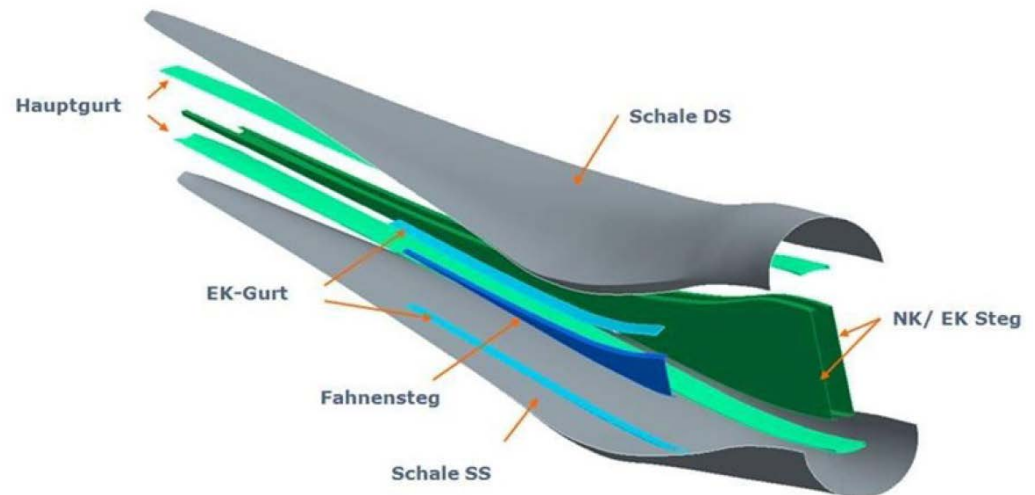
## Rotorblatt

### Aufgabe:

- Wandlung der Windenergie in mechanische Energie

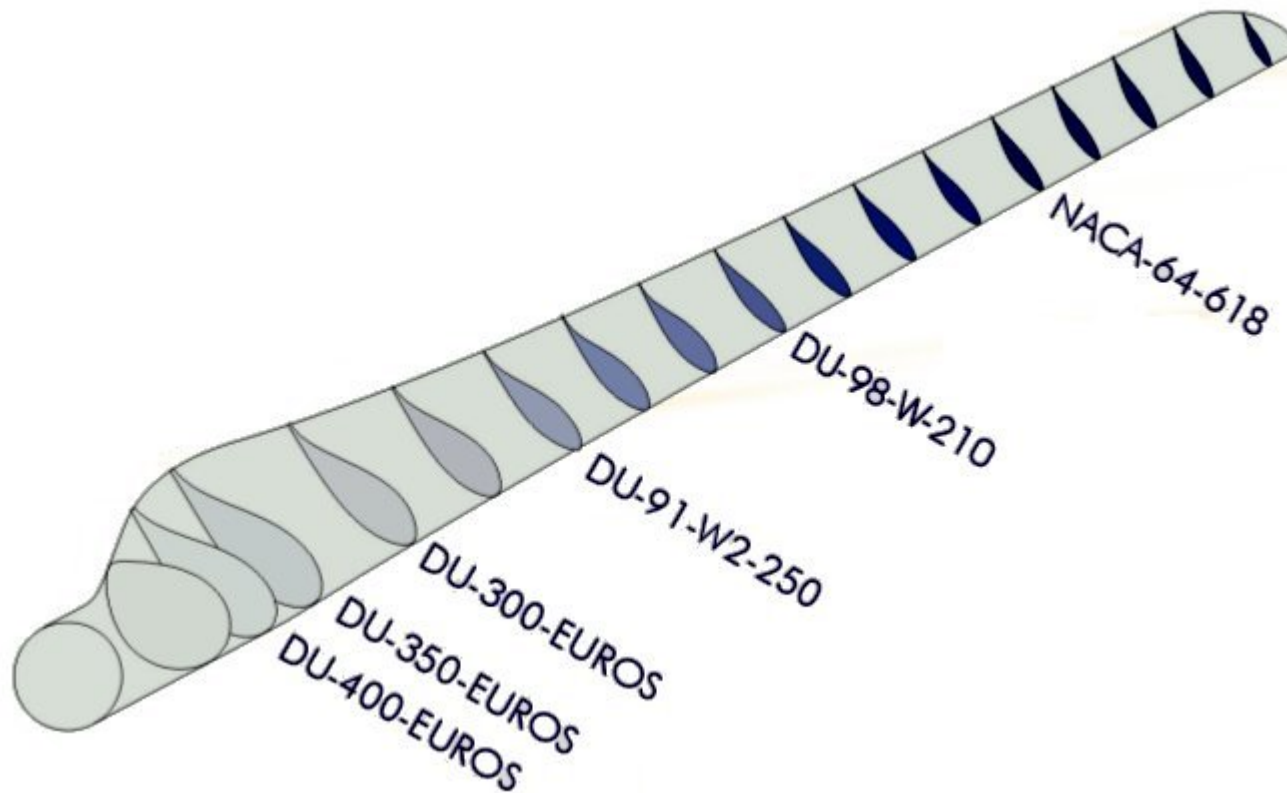
### Aufbau:

- 1 bis n Flügel
- Nutzung von Tragflügelprofilen (NACA, Göttinger-, spezielle Profile)
- i.d.R. Fertigung aus zwei Halbschalen
- Hauptbestandteile:
  - Glasfasern
  - Epoxidharz
  - Balsaholz
  - Schaumstoff
  - Karbonfasern



## Rotorblatt

Profilierung eines Rotorblattes der Firma Euros



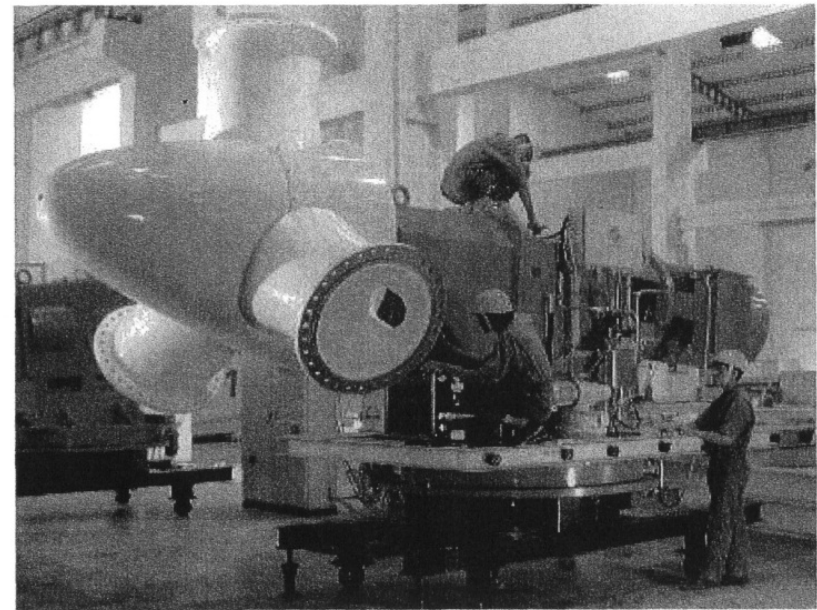
## Nabe

### Aufgabe:

- Aufnahme der Rotorblätter
- Leistungsübertragung auf die Rotorwelle

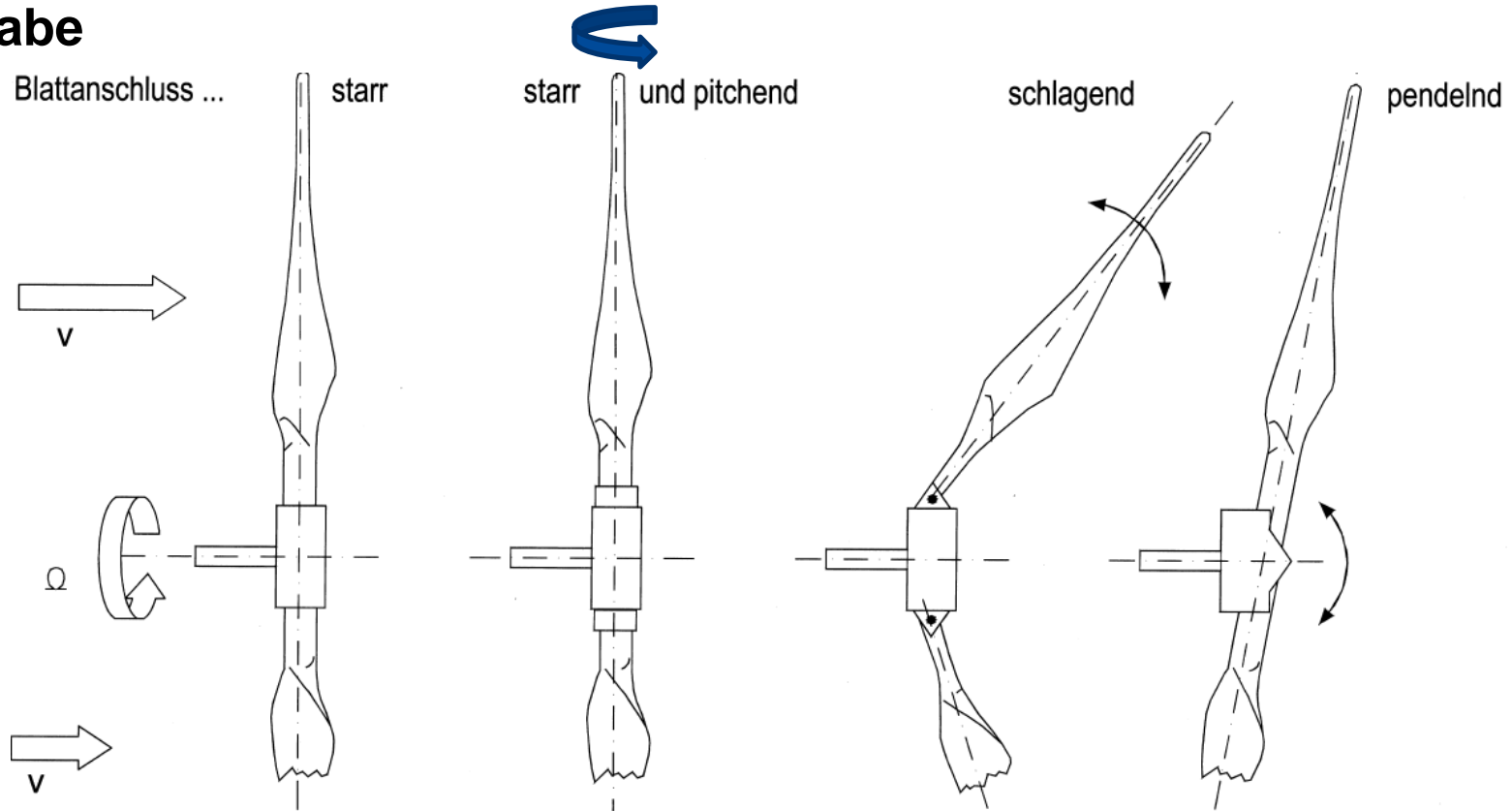
### Bauformen

- **starr**
- **starr (mit Blattwinkelverstellung)**
- gelenkig (schlagend)
- pendelnd



350 kW-Anlage in integrierter Triebstrangbauweise mit starrer Nabe

## Nabe



Hohe Biegewechsellast auf Rotorwelle und Schlagbiege(wechsel)last auf Blattwurzel

Entlastet alle Anlagenkomponenten von Beanspruchungen aus den mittleren Luftkräften bei Starkwind und Sturm

Entlastet Blattwurzeln von allen Schlagbiegemomenten und Rotorwelle von Biegewechsellasten aus räumlich ungleichmäßiger Rotoranströmung

Entlastet Rotorwelle von Biegewechsellasten aus räumlich ungleichmäßiger Anströmung und reduziert dynamischen Anteil von Schlagbiegemomenten an der Blattwurzel

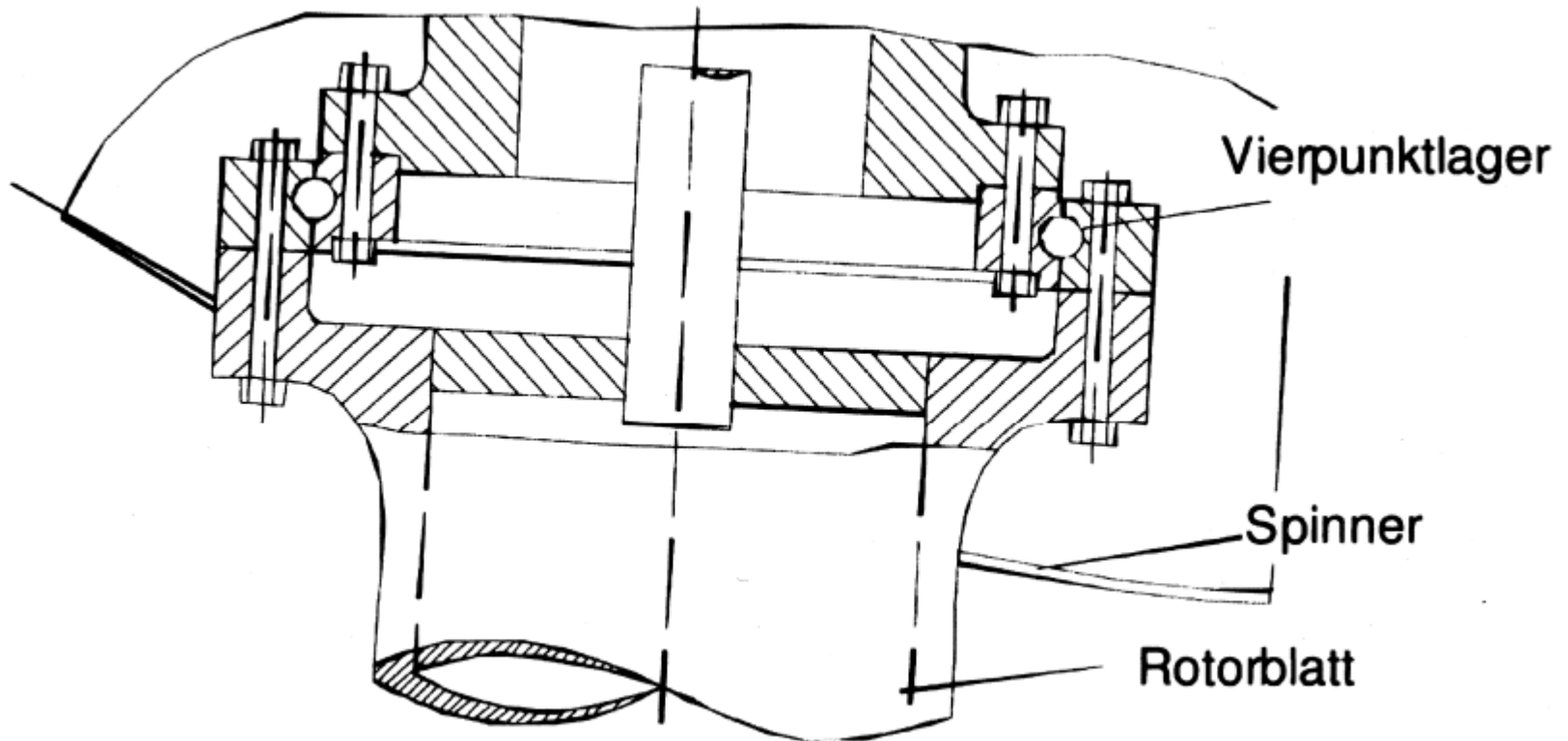
## Blattwinkerverstellung (synchrone Blattdrehung)

- Blattverstellung üblich bei größeren Anlagen ( $P > 500$  kW)
- Blattverstellmechanismus hat 2 Aufgaben:
  1. Leistungs- und Drehzahlregelung als primäre Aufgabe (Stellbereich  $20$ - $25^\circ$ )
  2. Bremse bis Stillstand  $\rightarrow$  Fahnenstellung ( $90^\circ$ )

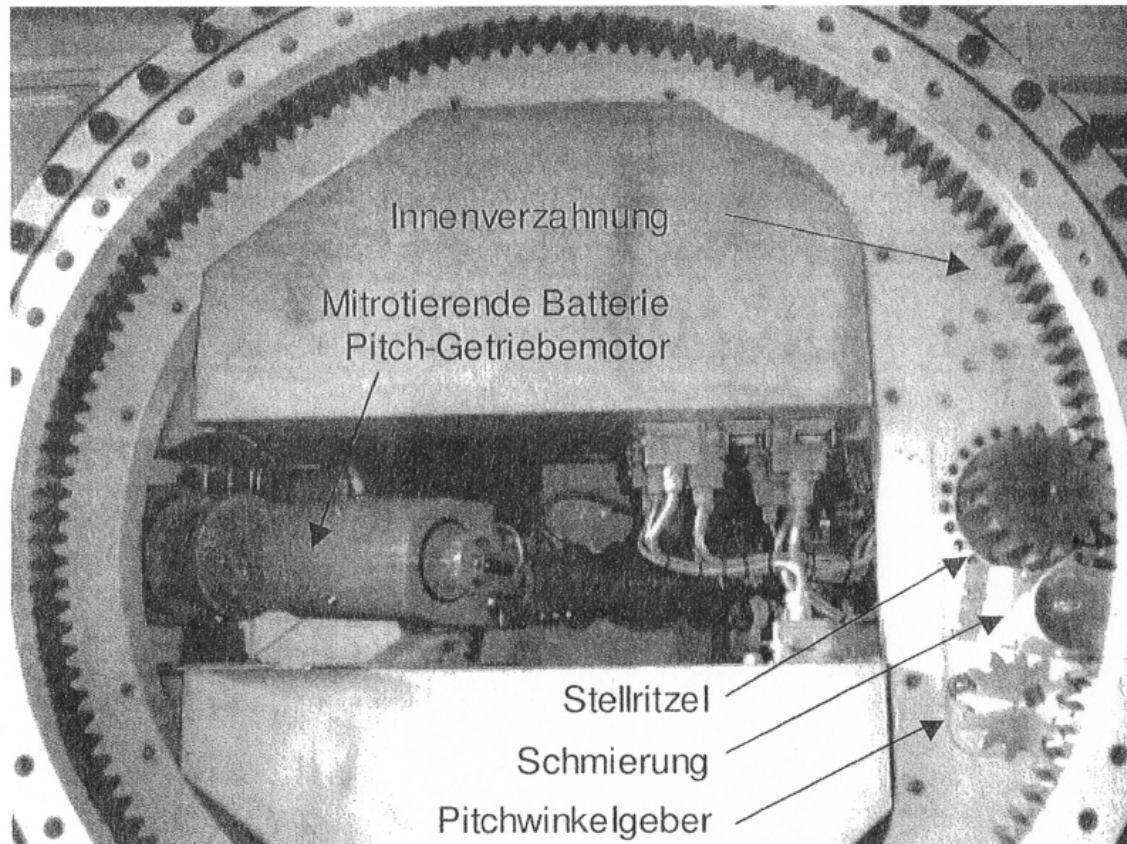
### Hauptkomponenten:

- Rotorblattlagerung: Lagerung über Wälzlager an der Blattwurzel
- Blattverstellmechanismus
  - elektrischer Antrieb
  - hydraulischer Antrieb
  - mechanische Verstellung durch Fliehgewichte

## Rotorblattlagerung:



## elektrischer Antrieb der Blattwinkelverstellung



Nabe einer 1,5 MW Pitch-Anlage mit elektrischen Getriebemotoren (Fa. REpower)

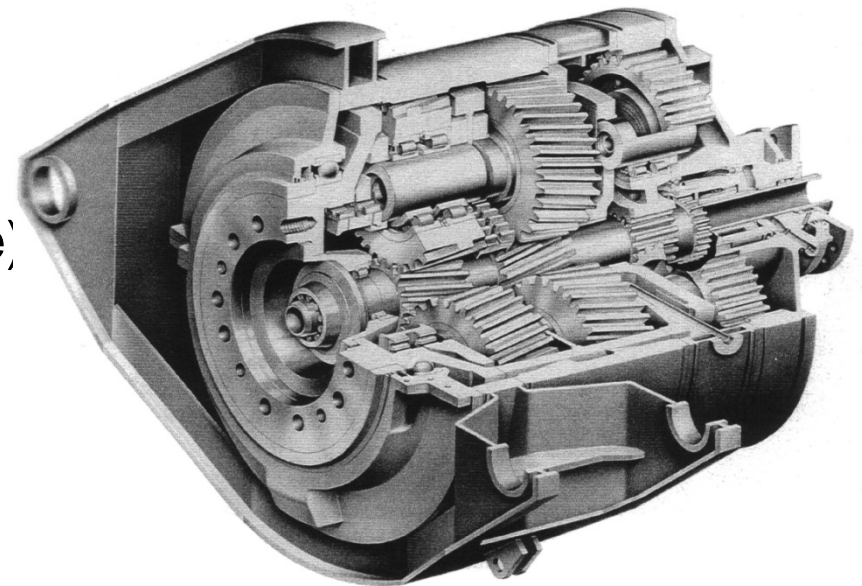
## Getriebe

### Aufgabe:

- Anpassung der Drehzahl des Rotors und der des Generators bzw. der folgenden Arbeitsmaschine
  - Rotordrehzahl großer Anlagen um  $20 \text{ min}^{-1}$
  - Generatordrehzahl 900 bis  $2000 \text{ min}^{-1}$  (Netzfrequenz 50 Hz)

### Bauformen:

- 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“

## Bremse

### Aufgabe:

- zwei unabhängige Bremssysteme vorgeschrieben, mindestens eine aerodynamisch
- Halten des Rotors im Stillstand
- Anhalten des Rotors im Notfall

### Ausführung:

- Nutzung von Scheibenbremsen
  - auf langsamer Welle → große Momente
  - auf schneller Welle → kleine Momente, aber Getriebe wird belastet
- zweites Bremssystem: Verdrehung des gesamten Flügels oder nur der Flügelspitzen

## Generator

### Aufgabe:

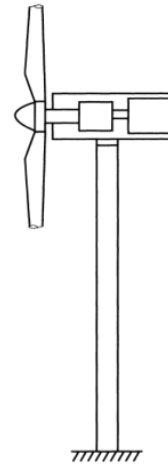
- Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie

### Ausführung:

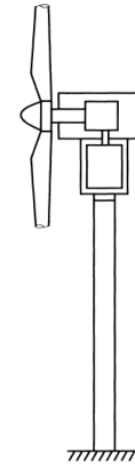
- Synchrongeneratoren
- Asynchrongeneratoren

# Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen

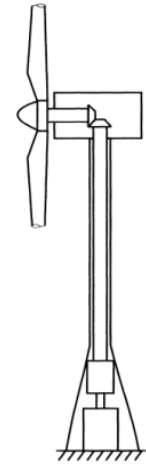
## Anordnung des Generators



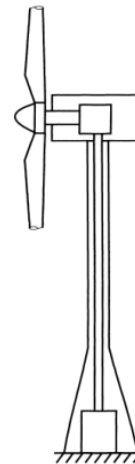
Getriebe und Generator im Maschinenhaus (Standardbauweise)



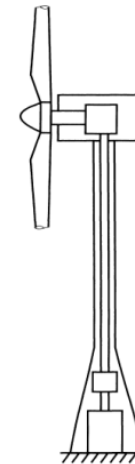
Generator senkrecht im Turmkopf



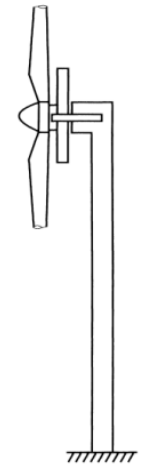
Getriebe und Generator im Turmfuß



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

## Windrichtungsnachführung

### Aufgabe:

- Drehen der Turbine in Windrichtung

### Ausführung:

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

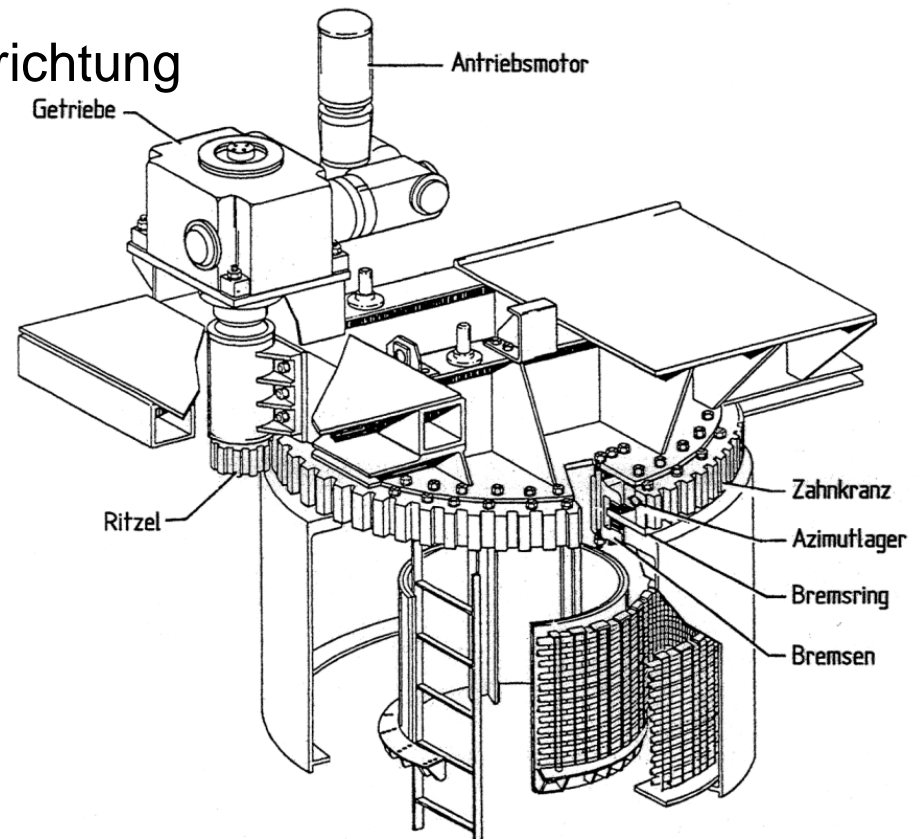


Bild entnommen aus Gasch, R.: Windkraftanlagen

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

## Maschinenträger

### Aufgabe:

- Aufnahme verschiedener Komponenten

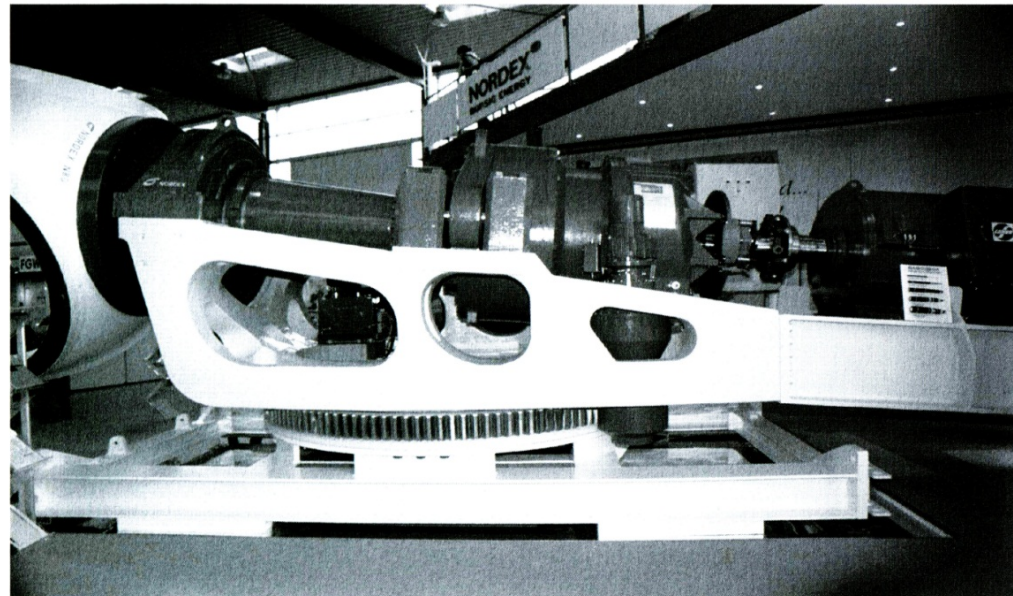


Bild 8.54: Gegossener Maschinenträger der Nordex N-80 (Material GG-6, Gewicht ca. 19 t) mit angeflanschem Generatorträger

## Turm

### Aufgabe:

- Aufnahme von Gondel und Rotor

### Ausführungen:

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

## 11.4 Der Wind

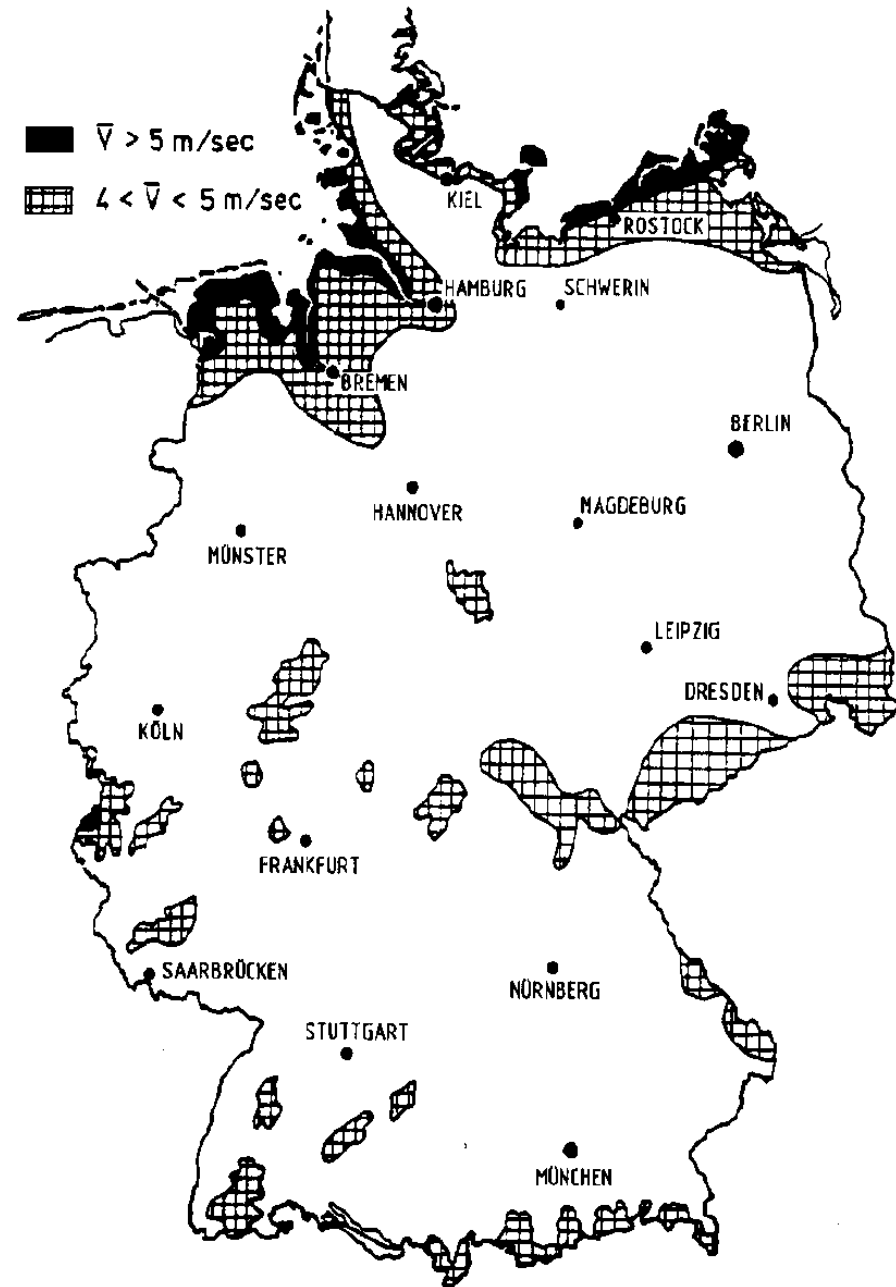
# Der Wind

## Nutzbarkeit

- wirtschaftliche Nutzung ab Windgeschwindigkeiten  $c_0 \geq 4,5 \frac{m}{s}$
- Anfahren ab ca. 3 m/s

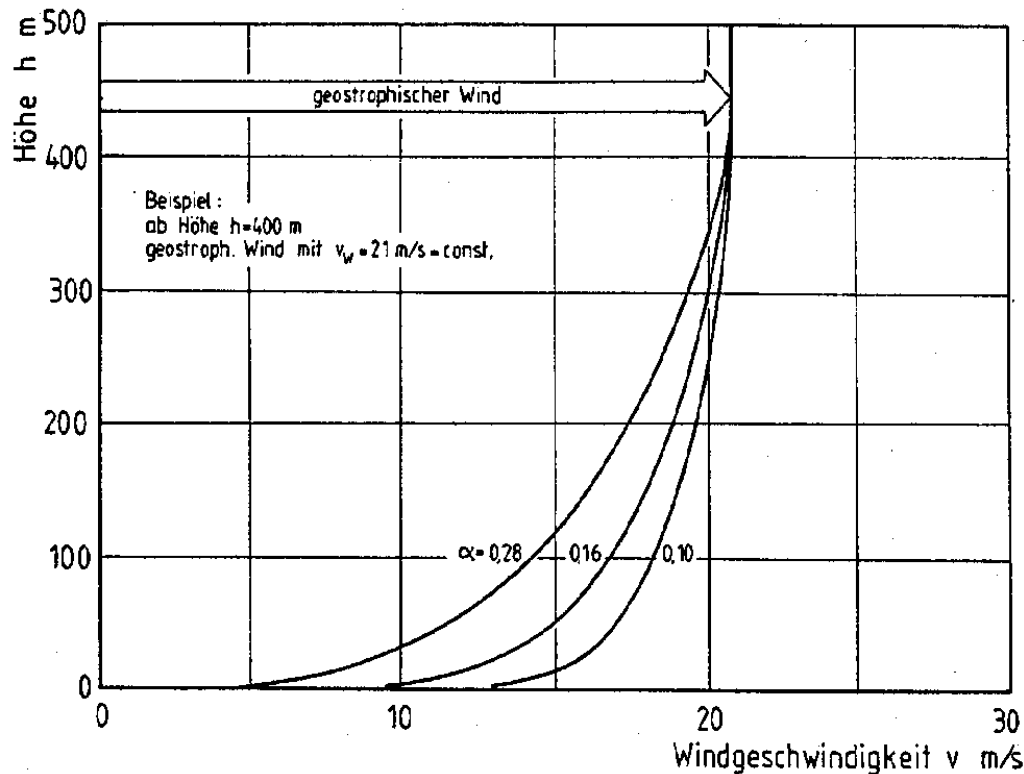
Gebiete in Deutschland, die für eine Aufstellung von Windkraftanlagen in Frage kommen (mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in 10 m Höhe)

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag



## Höhenabhängiges Windangebot

- Grenzschichteinfluss in Bodennähe



Statisches Höhenprofil der Windgeschwindigkeit, gerechnet mit unterschiedlichen Hellmann-Exponenten

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

## Höhenabhängiges Windangebot

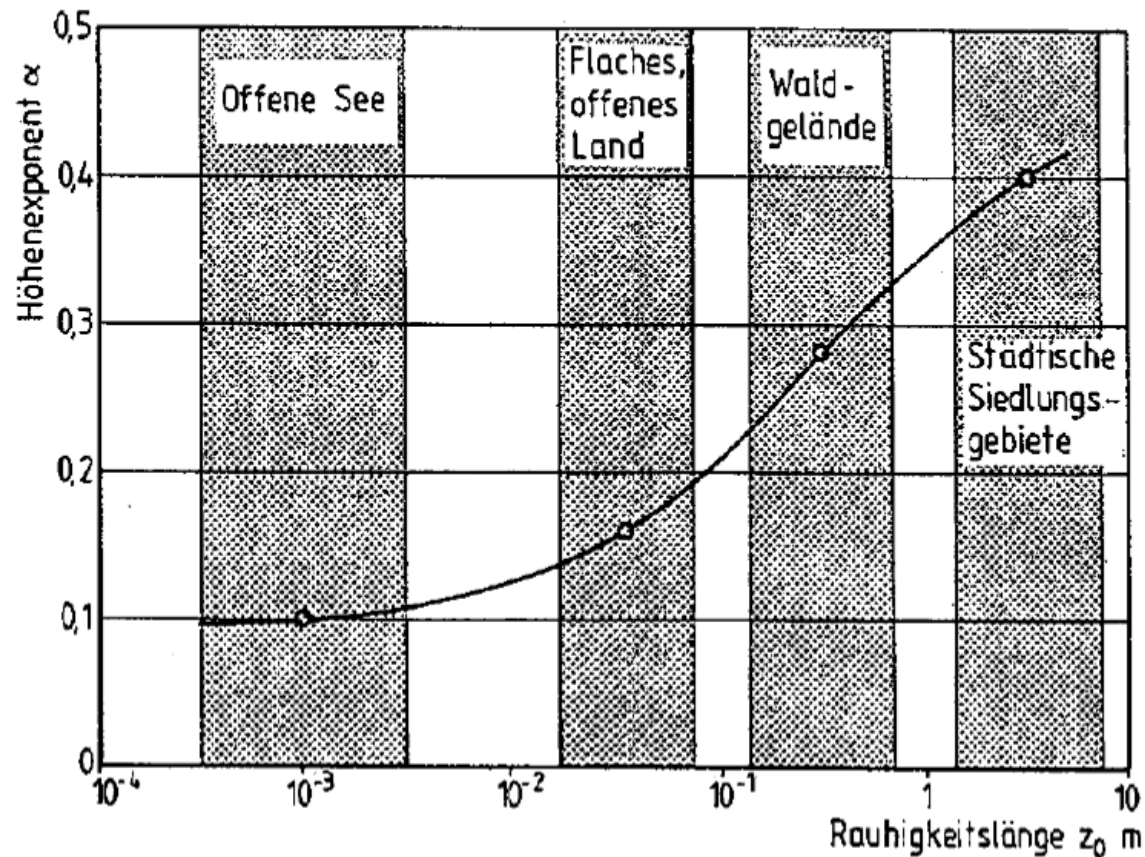
Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

### Potenzansatz nach Hellmann

$$v_H = v^* \cdot \left( \frac{H}{H^*} \right)^a$$

- $v_H$  = mittlere Windgeschwindigkeit
- $v^*$  = Bezugsgeschwindigkeit in einer Referenzhöhe
- $H^*$  = Referenzhöhe (i.d.R. 10 m)
- $a$  = Höhenwindexponent

## Höhenabhängiges Windangebot



Hellmann-Exponent für unterschiedliche Geländeformen

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag