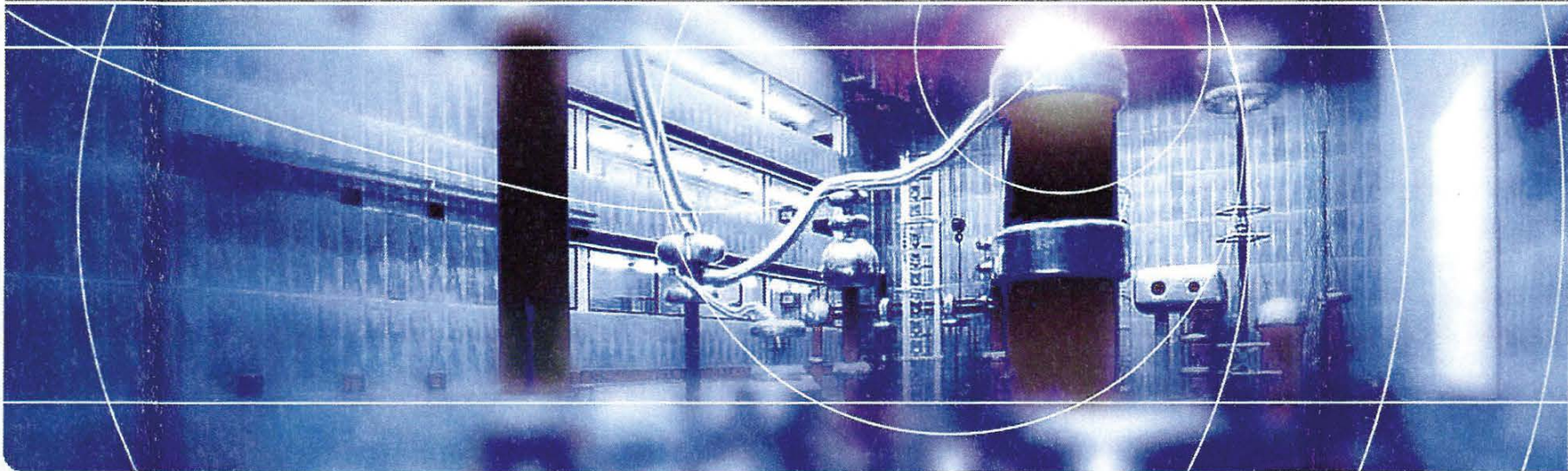


Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Windenergie: Theoretische Grundlagen

Sonnenenergie = Ursache für Luftströmungen

Regional unterschiedliche Lufterwärmung

⇒ Druckunterschiede

⇒ Ausgleichende Strömungen

Energieinhalt und Leistungsvermögen einer Luftströmung

(stationäre Luftströmung, d. h. $v = \text{const.}$)

Die kinetische Energie einer Luftströmung der Masse m und der Geschwindigkeit v ist

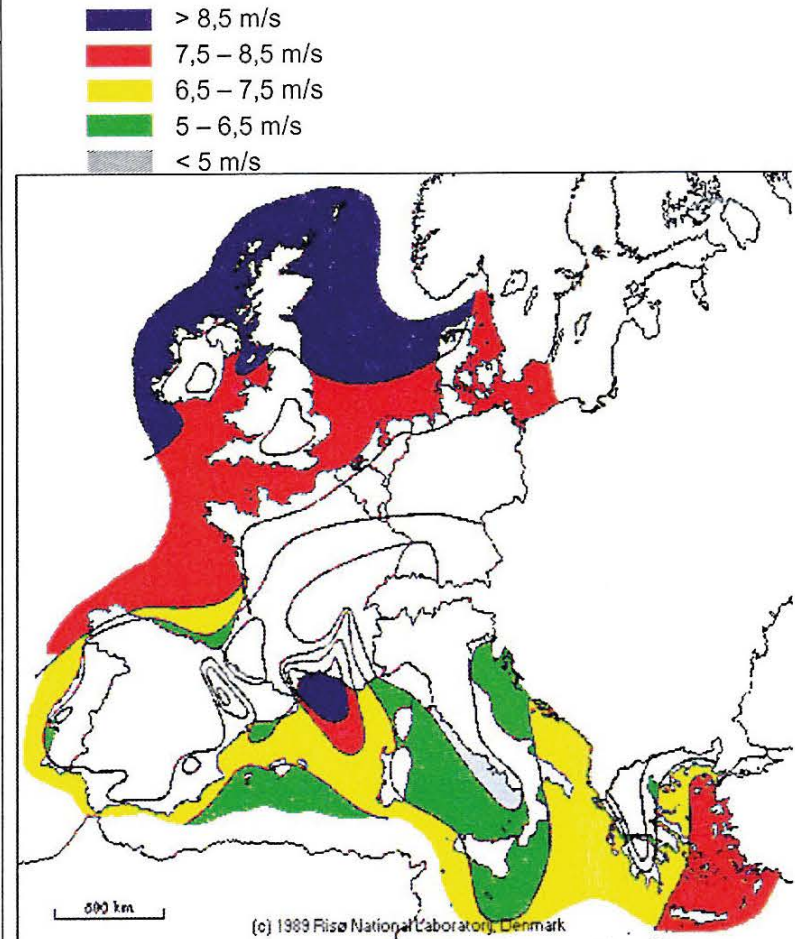
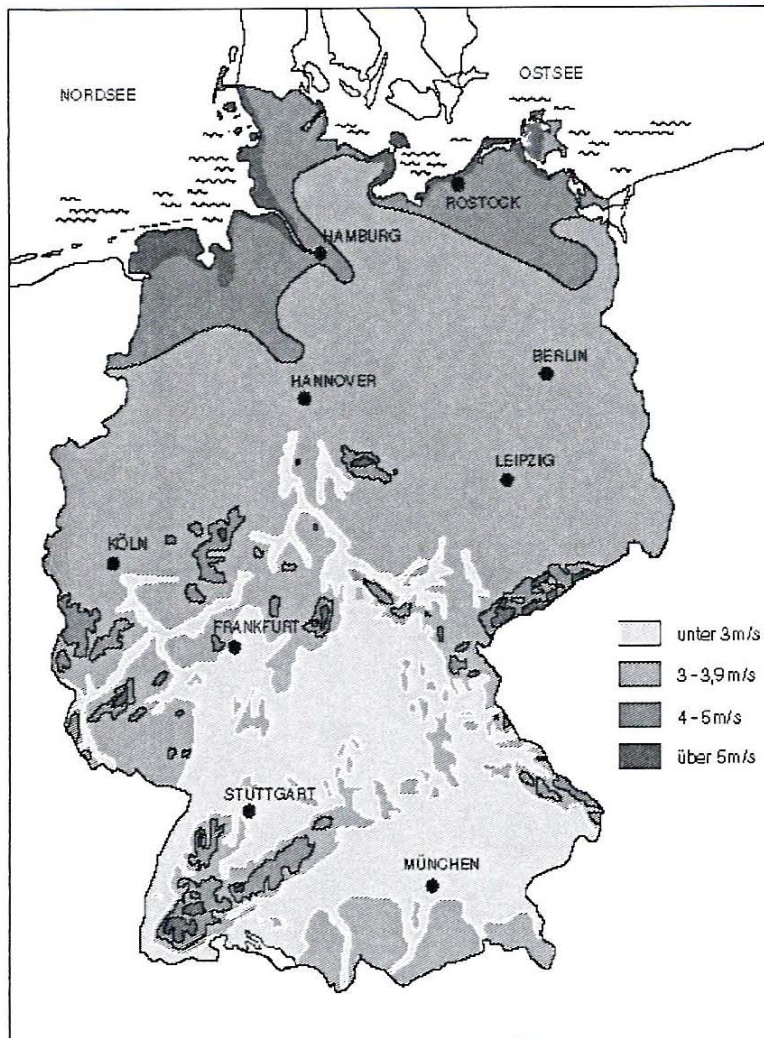
$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2$$

Leistungsvermögen: $P = \frac{d}{dt} W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt} \cdot v^2 + \rho \cdot V \cdot v \cdot \frac{dv}{dt}$

Stationäre Luftströmung: $P_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (A \cdot v) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$
($v = \text{const.}$)

Die verfügbare Leistung einer WEA (A fest) hängt vor allem von der Windgeschwindigkeit v ab.

Windatlas von Deutschland und der europäischen Küstenregion



Wirkungsgrad von Windkraftanlagen (I)

Wegen der Kontinuitätsbedingung gilt vor und nach der Windturbine für den Massenstrom

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= \rho \cdot \dot{V}_1 = \rho \cdot A_1 \cdot \frac{\Delta S_1}{\Delta t} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 \\ &= \dot{m}_2 = \rho \cdot \dot{V}_2 = \rho \cdot A_2 \cdot \frac{\Delta S_2}{\Delta t} = \rho \cdot A_2 \cdot v_2\end{aligned}$$

An der Windturbine tritt die mittlere Geschwindigkeit

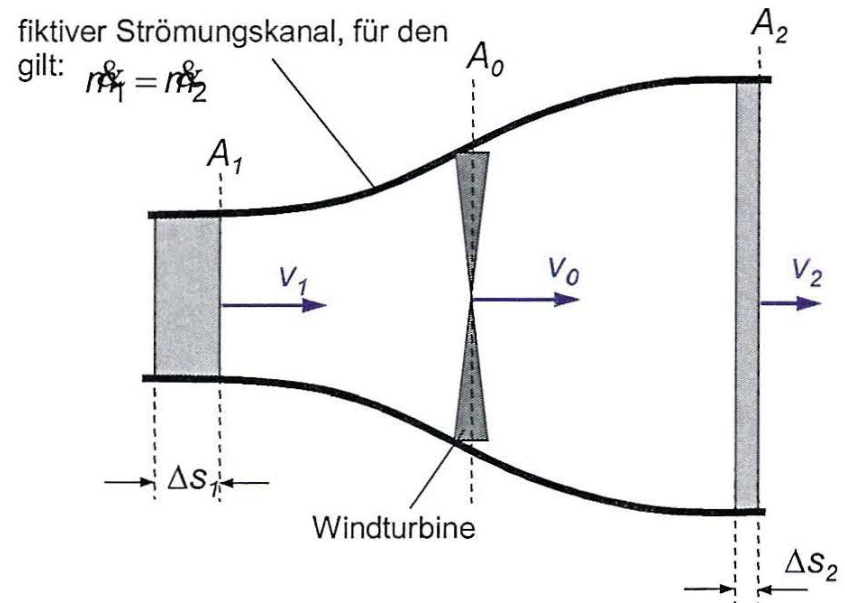
$$v_0 = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

auf

Leistung die dem Windstrom entnommen wird, hängt ab von:

- der Differenz der Windgeschwindigkeiten vor und nach der Windturbine
- dem Luftmassenstrom durch die Windturbine

$$\begin{aligned}P_{\text{Nutz}} &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_0 \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A_0 \cdot v_0) \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \left(\rho \cdot A_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \right) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)\end{aligned}$$



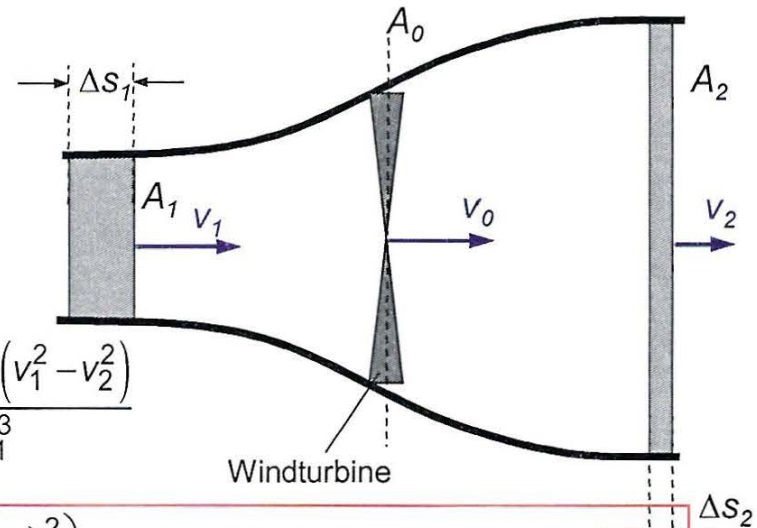
Wirkungsgrad von Windkraftanlagen (II)

Ohne die Windturbine hat die Luftmasse die Leistung

$$P_{Zu} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_1^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_1^3$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{Zu}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{v_1^3}$$



Mit $\lambda = \frac{v_2}{v_1}$ erhält man $\eta = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \lambda) \cdot (1 - \lambda^2) = \frac{1}{2} \cdot (-\lambda^3 - \lambda^2 + \lambda + 1)$

Das Maximum tritt auf, wenn die 1. Ableitung des Wirkungsgrades η nach $\lambda = 0$ ist:

$$\frac{d\eta(\lambda)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{1}{2} \cdot (-\lambda^3 - \lambda^2 + \lambda + 1) \right] = \frac{1}{2} \cdot (-3\lambda^2 - 2\lambda + 1) \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{mit} \quad \lambda_1 = \frac{1}{3} \quad \text{und} \quad \lambda_2 = -1$$

$$\eta_{opt} = \frac{P_{Nutz}}{P_{Zu}} \bigg|_{\lambda_{opt} = \frac{1}{3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{32}{27} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

Physik:

$\eta_{opt} < 1$, da der Luftstrom nach der Windturbine eine bestimmte kinetische Energie haben muß, um abtransportiert zu werden

Gesamtwirkungsgrad und Antriebsprinzipien von Windkraftanlagen

Gesamtwirkungsgrad:

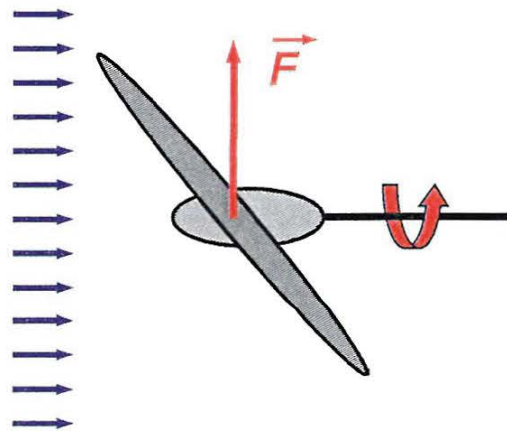
$$\eta_W = \frac{P_{el}}{P_{Wind}} = \frac{P_{el}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} < \eta_{opt} \approx 0,593$$

Abhängig vom Antriebsprinzip

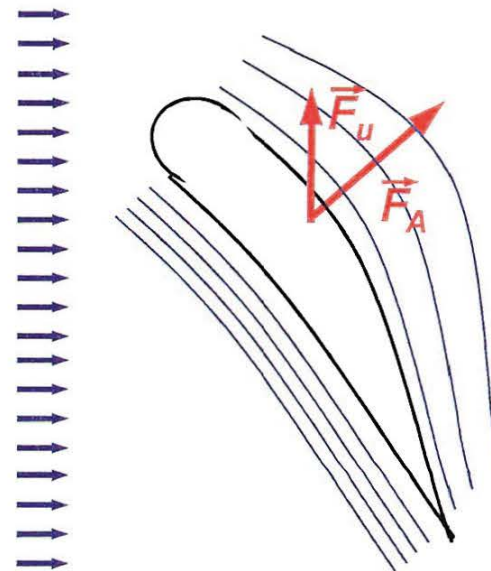
$$\eta_{W,max} = 0,4 \dots 0,5$$

Antriebsprinzipien des Windrades:

- Widerstandsprinzip
- Auftriebsprinzip



Widerstandsprinzip



Auftriebsprinzip

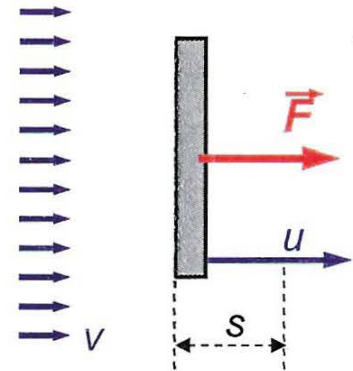
Antrieb des Windrades nach dem Widerstandsprinzip (I)

Wind strömt mit der Geschwindigkeit v auf die Fläche A ; diese bewegt sich daraufhin mit der Geschwindigkeit u . Die Luft strömt mit der Geschwindigkeit

relativ zu der Fläche.

$$c = v - u$$

Kraftwirkung auf die Fläche: $F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot c^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (v - u)^2$



Durch die Kraft bewegt sich die Fläche (der Körper) um die Strecke s .
Dadurch wird die Arbeit

$$dW = F_W \cdot ds = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (v - u)^2 \cdot ds$$

geleistet.

Daraus ergibt sich die Nutzleistung $P_{Nutz} = \frac{dW}{dt} = F_W \cdot \frac{ds}{dt} = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (v - u)^2 \right] \cdot \frac{ds}{dt}$
$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (v - u)^2 \cdot u$$

Zugeführt wird die Leistung einer Luftströmung mit der Geschwindigkeit v $P_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$

Antrieb des Windrades nach dem Widerstandsprinzip (II)

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{Wind}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (v-u)^2 \cdot u}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} = c_w \cdot \frac{u}{v} \cdot \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 = c_w \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^2$$

Das Maximum tritt auf, wenn die 1. Ableitung des Wirkungsgrades η nach $\lambda = 0$ ist:

$$\frac{d\eta}{d\lambda} \stackrel{!}{=} 0 = \frac{d}{d\lambda} (c_w \cdot (\lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda)) = c_w \cdot (3\lambda^2 - 4\lambda + 1) \quad \text{Lösung: } \lambda_{opt} = \frac{u}{v} = \frac{1}{3}$$

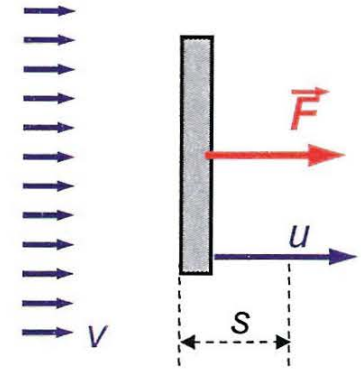
Optimaler Wirkungsgrad

$$\eta_{opt} = \left. \frac{P_{Nutz}}{P_{Wind}} \right|_{\lambda_{opt} = \frac{1}{3}} = \frac{4}{27} \cdot c_w \approx 0,148 \cdot c_w$$

Maximaler Widerstandsbeiwert $c_{w,max}$ für eine offene Halbkugel $c_{w,max} = 1,3$

ergibt:

$$\eta_{opt,max} = \left. \frac{P_{Nutz}}{P_{Wind}} \right|_{\lambda_{opt} = \frac{1}{3}} \approx 0,148 \cdot c_{w,max} = 0,148 \cdot 1,3 \approx 0,193$$



Antrieb des Windrades nach dem Auftriebsprinzip

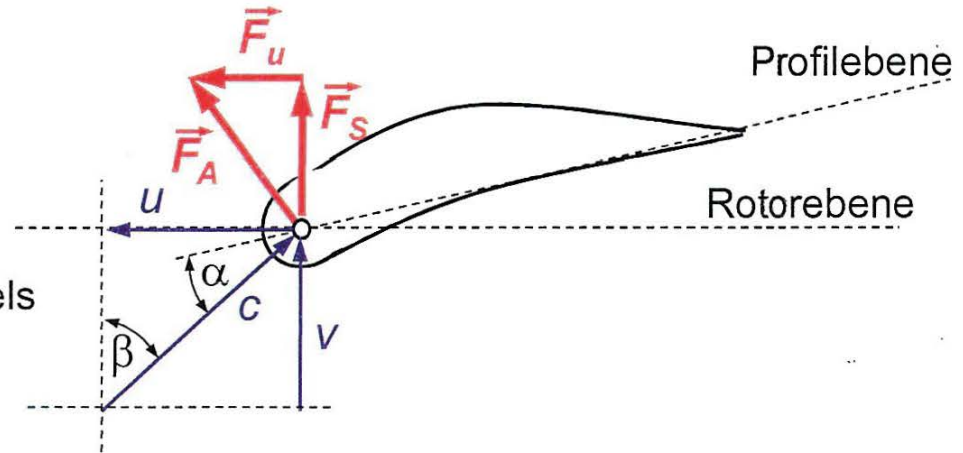
Auftriebskraft:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_P \cdot c_A \cdot c^2$$

c_A : Auftriebsbeiwert

A_P : Projektionsfläche des Flügels auf die Rotorebene

$$A_P \approx \text{Flügelbreite} \cdot \text{Flügelänge}$$



Widerstandskraft: $F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_P \cdot c_W \cdot c^2$

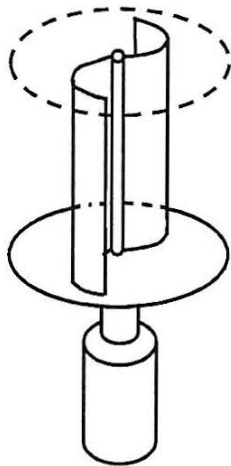
Gleitzahl: $\varepsilon = \frac{F_A}{F_W} = \frac{c_A}{c_W} \approx 60 \dots 180 \quad F_W = F_A$

F_A kann zerlegt werden in F_S und in F_u , F_u sorgt für den Vortrieb des Flügels

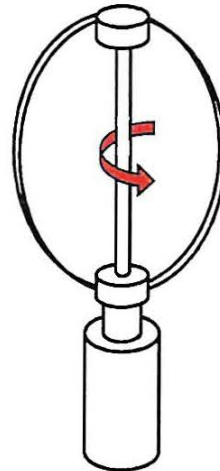
resultierende Anströmgeschwindigkeit $c = \sqrt{v^2 + u^2} = v \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{u}{v}\right)^2} = v \cdot \sqrt{1 + \lambda^2}$

Auftriebsprinzip: $c > v$ d.h. $\lambda > 1 \Rightarrow$ hohes $c \Rightarrow$ hohes F_A

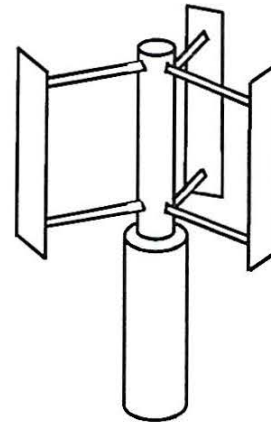
Wegen $\tan \beta = \frac{u}{v}$ und $u = r \cdot \omega = u(r)$ Anpassung des Flügels in radialer Richtung



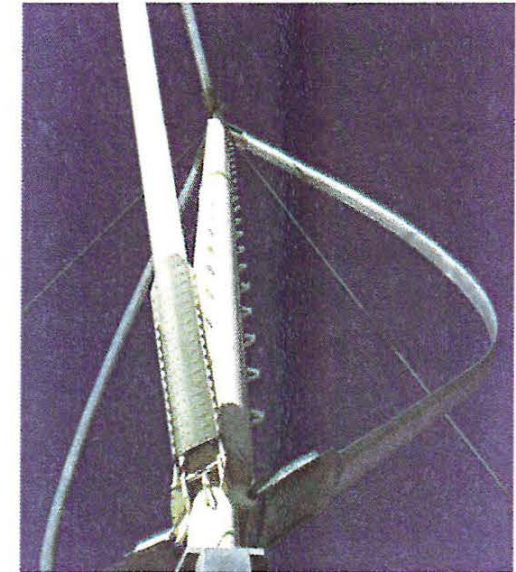
Savonius-



Darrieus-



H-Darrieus-Rotor



Darrieus-Rotor:

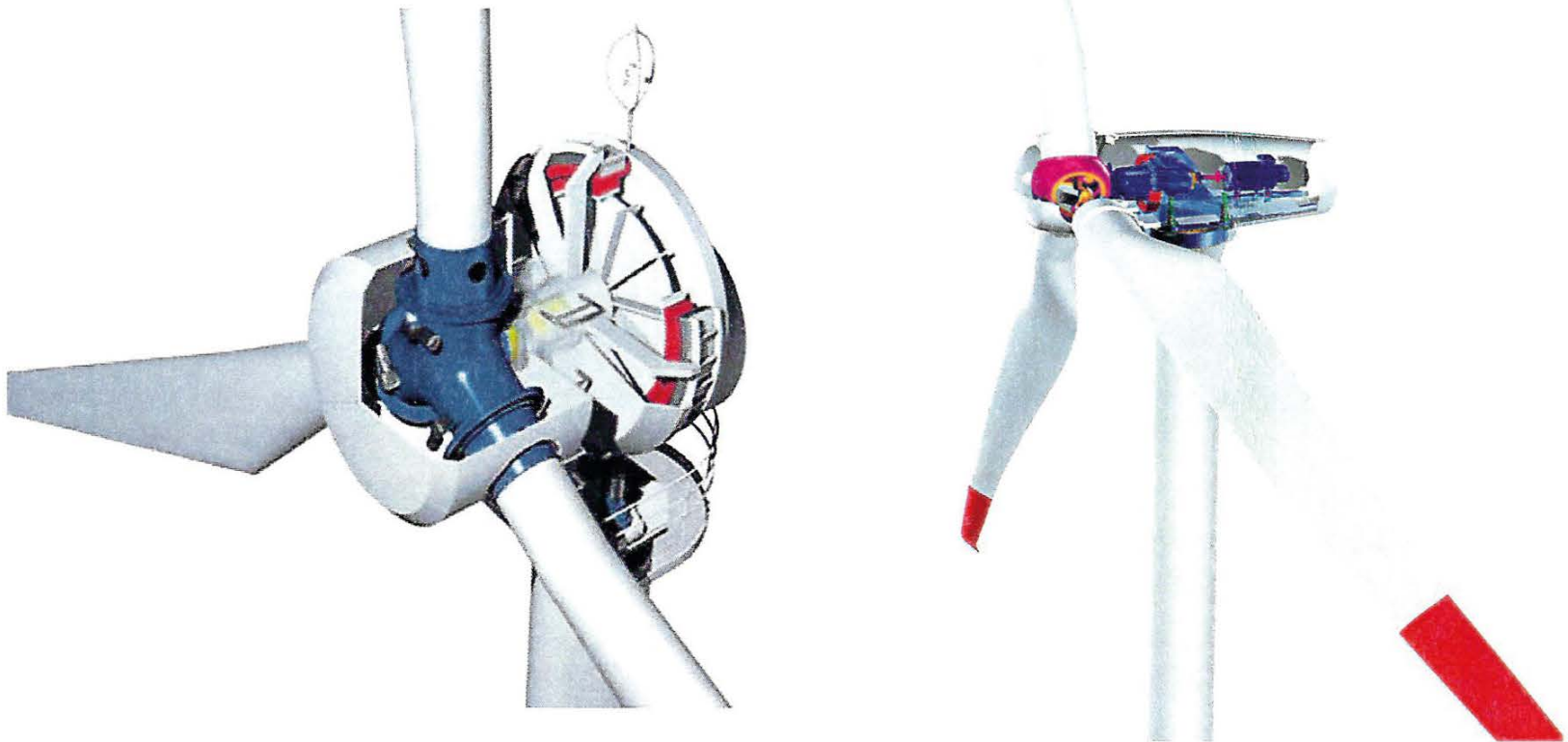
- hohe Windgeschwindigkeiten notwendig
- benötigt Anlaufhilfe
- ist nicht regelbar
- geringerer Wirkungsgrad als Horizontalachsenkonv.

Savonius-Rotor:

- benötigt keine Anlaufhilfe
- geringe Wirkungsgrade (23...25 %)
- η kleiner als beim Darrieus-Rotor

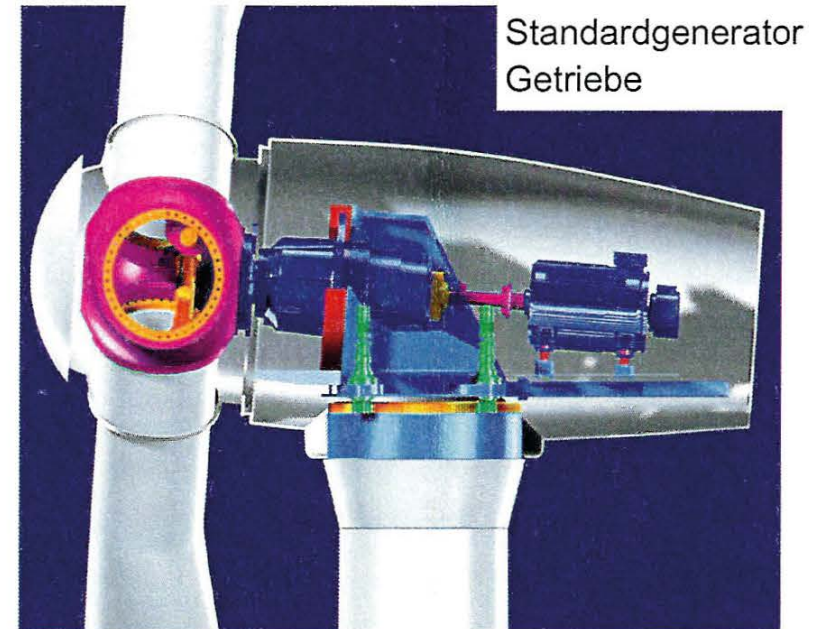
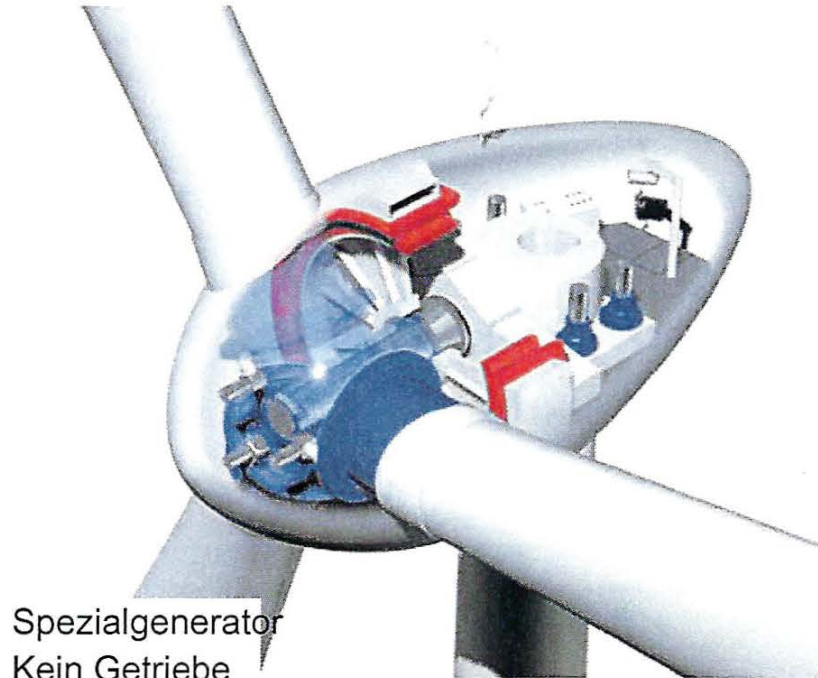
Vorteil der Vertikalachsenkonverter: Generator, Getriebe etc. in der Bodenstation, einfache Bauweise, einfache Wartung

Horizontalachsenkonverter: Hauptbaugruppen



- Rotor (Rotorblätter, Rotornabe, Rotorbremse und ggf. Mechanik zu Verstellung des Anstellwinkels)
- Generator und ggf. Getriebe (zur Anpassung der Rotordrehzahl an den Drehzahlbereich des Generators)
- Fundament und Turm
- Gondel (Turmkopf), in der Generator, Getriebe, Rotorbremse etc. untergebracht sind
- Windmeßsystem und Windnachführung (Azimutverstellung).

Horizontalachsenkonverter: Generator, Getriebe, Rotor



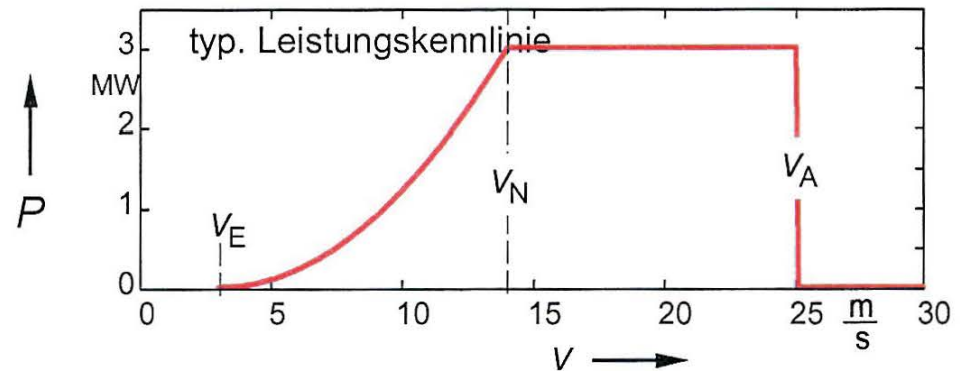
Rotoren:

Hohe Blattzahl bedeutet Verringerung des Wirkungsgrades, „vorlaufender“ Flügel bewirkt Luftverwirbelung für den „nachfolgenden“ Flügel

3-Blatt-Rotoren sind optimal hinsichtlich Wirkungsgrad, Laufruhe (d. h. Materialbeanspruchung) und Optik

Horizontalachsenkonverter: Regelung

- Pitch -Regelung
- Stall -Regelung



Stall-Regelung:

Ab bestimmten Windgeschwindigkeiten entstehen aufgrund der Form des Flügels Luftwirbel auf der Flügelrückseite

⇒ Luftwirbel reduzieren die Auftriebskraft

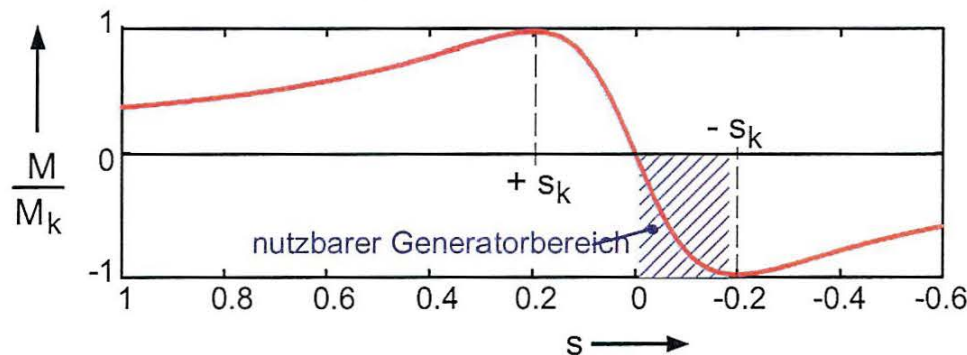
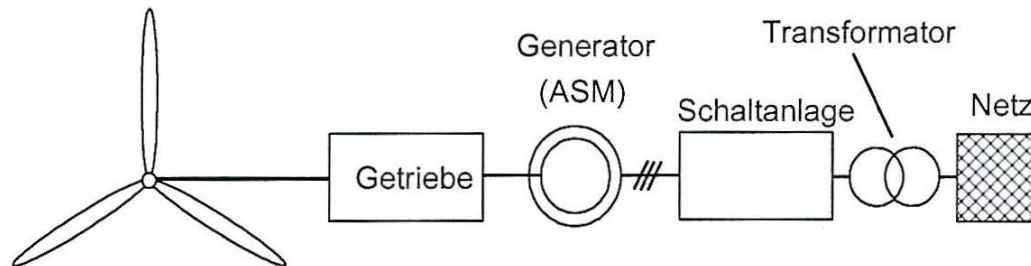
⇒ Automatische Bremsung, d. h. Begrenzung der Rotorgeschwindigkeit („Abregelung“)

Pitch-Regelung:

Verstellung der Rotorblätter, bei schwachem Wind werden die Rotorblätter so gestellt, daß sich optimale Strömungsverhältnisse ergeben, bei stärkerem Wind werden die Rotorblätter zunehmend aus dem Wind gedreht

Problematisch: Ausregelung kurzer Windböen, hier umrichter gespeiste ASM oder SM

I. ASM und drehzahlstarrer Betrieb

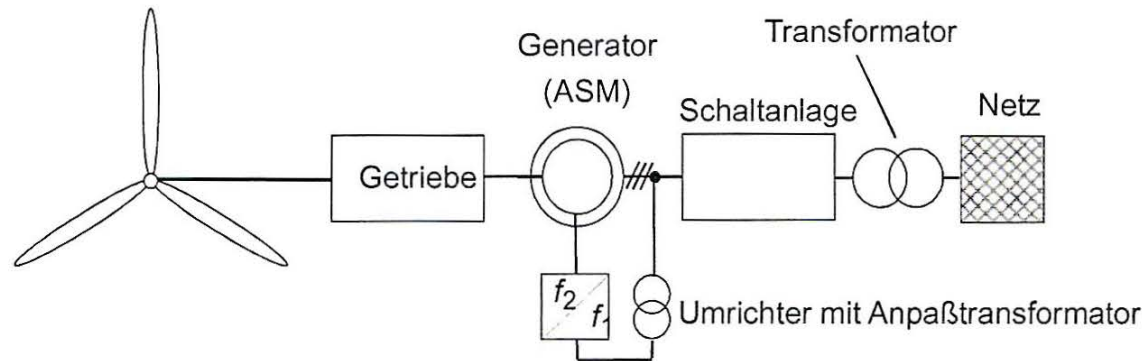


$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{mit} \quad n_s = \frac{f_{\text{Netz}}}{p}$$

Eigenschaften:

- Netz muß der ASM induktive Blindleistung zuführen
- ASM synchronisiert sich im nutzbaren Bereich selbst, das Überschreiten des Kippunktes zu vermeiden.
- Generatordrehzahl liegt etwas über der synchronen Drehzahl

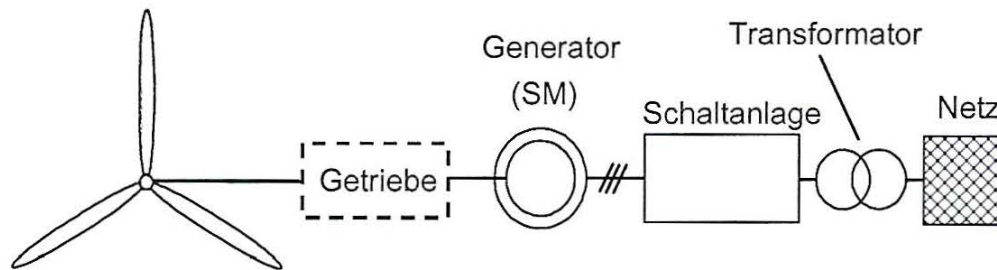
II. ASM und Speisung des Läuferkreises, so daß stets $f_1 = 50$ Hz



Eigenschaften:

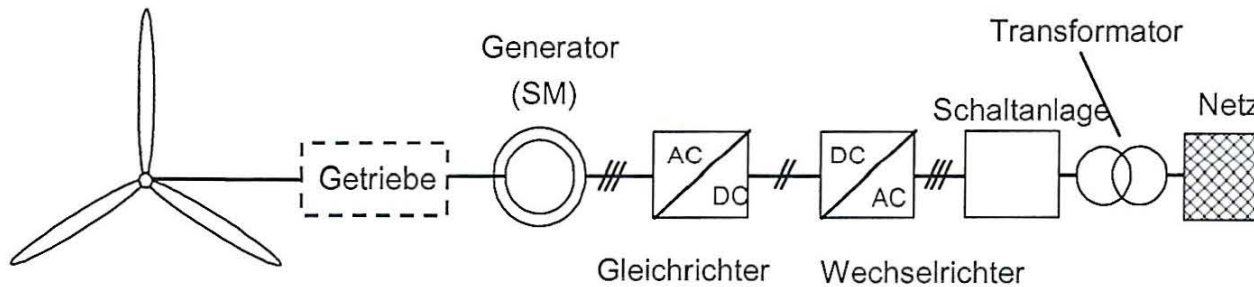
- Anpaßtransformator und Umrichter notwendig, Konzept damit aufwendiger
- getrennte Beeinflussung von Wirk- und Blindleistung möglich
- über- und untersynchroner Betrieb möglich, d. h. Drehzahl des Generators kann über oder unter der synchronen Drehzahl liegen

III. SM, direkte Kopplung ans Netz



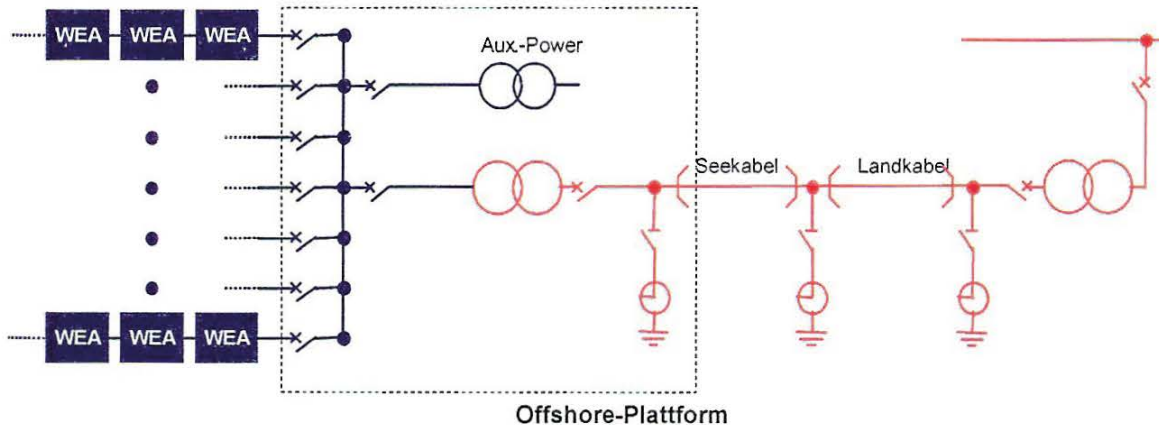
- Drehzahl des Rotors ist konstant
- Windgeschwindigkeit ändert nur den Polradwinkel
- Läuferdrehfeld eilt dem Statorfeld um den Polradwinkel vor
- Leistungssprünge durch Windböen werden nahezu ungedämpft an Netz weitergegeben

IV. SM, Kopplung über Gleich-/Wechselrichter ans Netz



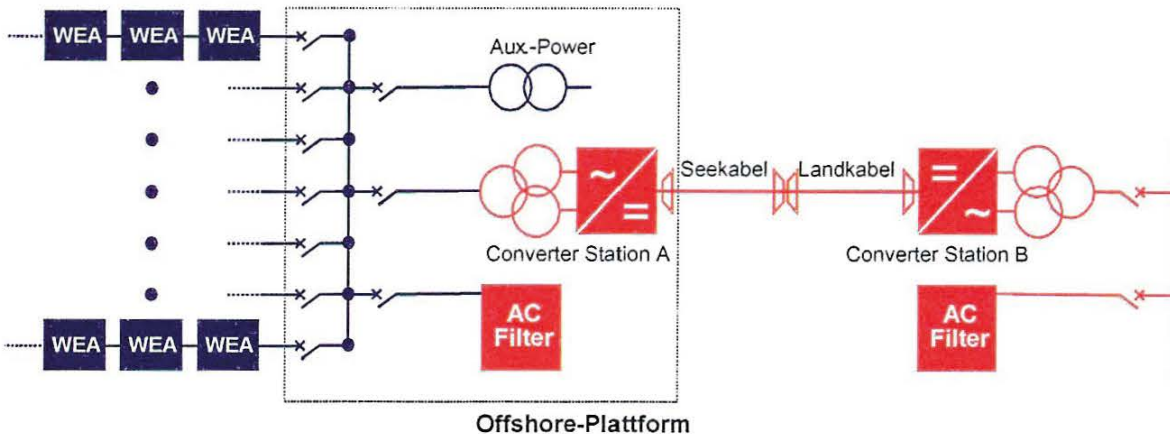
- Frequenz der SM ist variabler als bei obigem Konzept
- netzgeführte oder selbstgeführte Wechselrichter
- Optimaler Betrieb des Rotors über einen weiten Bereich der Windgeschwindigkeit möglich

Energieeinspeisung: HVAC oder HVDC?



- Kabelkapazität muß durch Drosseln kompensiert werden
- hohe Kabelverluste
- aber
- bewährte Technik
- geringer Platzbedarf

- Wirk- und Blindleistungsfluß gezielt steuerbar
- geringere Kabelverluste

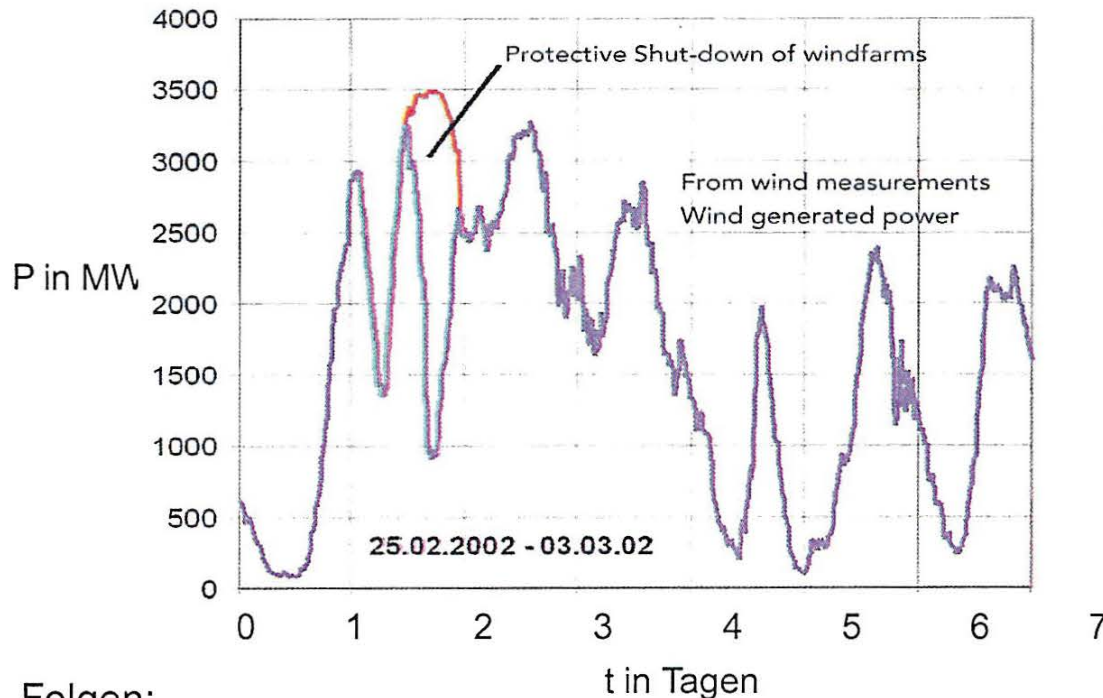


Break-even abhängig von:

- Länge der Verbindung
- Windparkleistung
- Anzahl der Systeme
- Verlustbewertung

Problematik der Energieversorgung durch Windkraftanlagen

Eingespeiste Leistung von WEA in das Netz der E.ON AG



Problem:

Das Aufkommen von Windenergie schwankt also zeitlich sehr häufig und auch sehr schnell

Folgen:

- Hohe Reserveleistung an konventionellen Kraftwerken notwendig
- Mehrverbrauch von Primärenergie der konventionellen Kraftwerke durch häufiges Anfahren
- Höherer Verschleiß der konventionellen Kraftwerke durch häufige Lastwechsel