

The background of the slide features a series of wind turbines in silhouette, receding into the distance on the left side. The sky is a gradient of colors from a pale blue at the top to a bright orange and yellow at the bottom, where the sun is setting. The sun is a bright, glowing orb just above the horizon line. The overall scene is a serene and atmospheric depiction of a wind farm at dusk or dawn.

Windkraftanlagen

Aufbau

Betrieb

Probleme

Grundlagen

Eine Windkraftanlage wandelt die *kinetische* Energie des Windes in *elektrische* Energie um.

$$P_{MaxWind} = \frac{1}{2} r^2 \pi \cdot \rho \cdot v^3$$

- Möglichst hohe Windgeschwindigkeiten
- Große Anlagen effizienter
- Auch Luftdichte ρ hat Einfluss (Änderung: $\sim 0,4\%$ pro $^{\circ}\text{C}$)

Formel gilt für SCHEIBENFÖRMIGE Energiewandler



Beispiele

70m Rotordurchmesser, $v = 10\text{m/s}$, 20°C

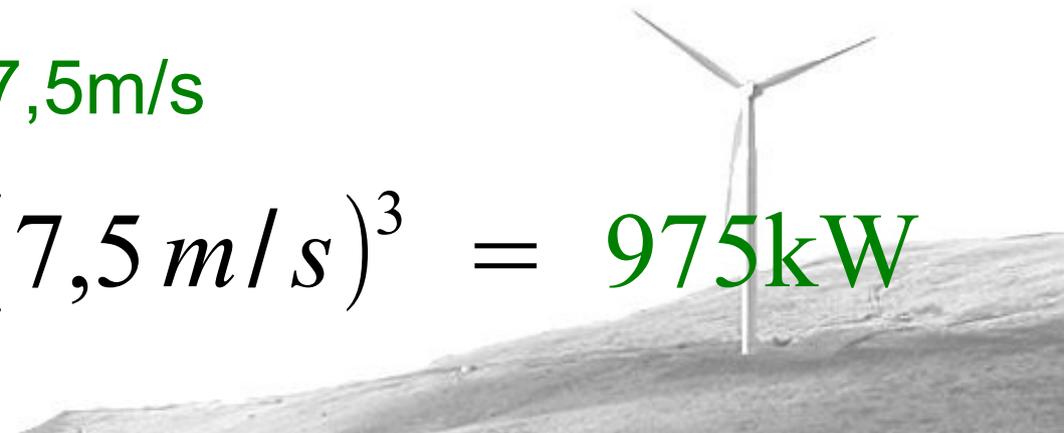
$$\frac{1}{2} (35\text{m})^2 \pi \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot (10\text{m/s})^3 = 2,3 \text{ MW}$$

7m Rotordurchmesser, $v = 10\text{m/s}$

$$\frac{1}{2} (3,5 \text{ m})^2 \pi \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot (10\text{m/s})^3 = 23\text{kW}$$

70m Rotordurchmesser, $v = 7,5\text{m/s}$

$$\frac{1}{2} (35\text{m})^2 \pi \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot (7,5 \text{ m/s})^3 = 975\text{kW}$$



Erntegrad (cp)

≠ Wirkungsgrad!

Theoretisches Maximum: $16/27$ (~59,3%)

Der Wind wird dabei auf $1/3$ abgebremst
= Betzsches Gesetz

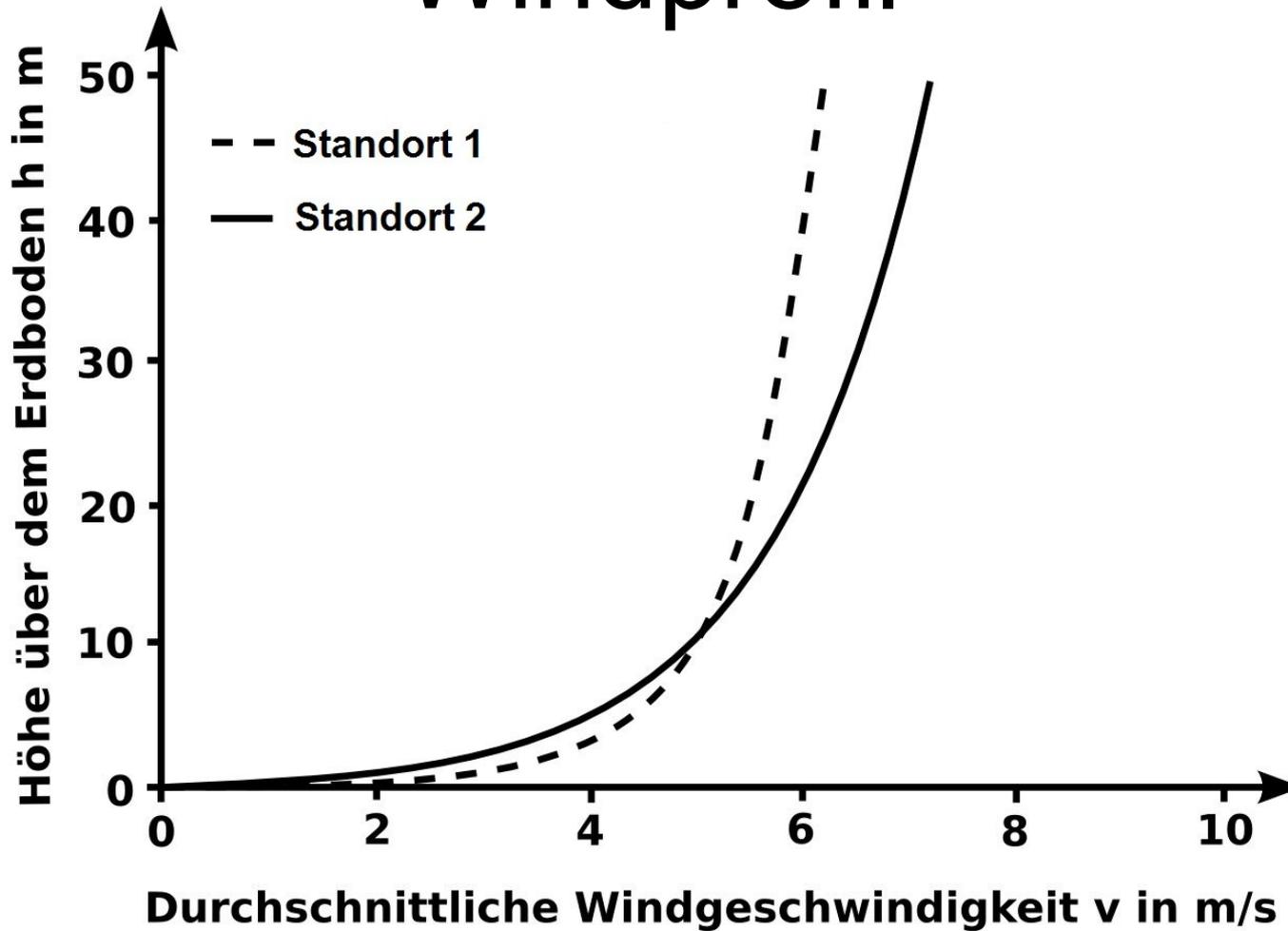
Real max. 70-80% davon erreichbar

$$2,3 \text{ MW} \cdot 0,593 \cdot 0,75 = 1 \text{ MW}$$

Max. Wirkungsgrad i.A nicht bei Nennleistung



Windprofil



1m höher → 1% mehr Ertrag (Vorsicht!)
Bei Turbulenzen und im Gebirge wird es
schwieriger...



Einteilung

- Achsenausrichtung
 - Schnellaufzahl
 - Flügelanzahl
 - Baugröße
- Leistungsklasse
 - Windklasse
- Drehzahlregelung
 - Klimaklasse
 - ...



Vertikalachsenrotoren

- Darrieusrotor
H-Rotor



- Savoniusrotor

Einfach und robust, aber schlechte Energieausnutzung



Horizontalachsenrotor

Gute Energieausnutzung, sehr weit verbreitet
„Upwind“ (Luvläufer) und „Downwind“ (Leeläufer)



→ Beschränkung auf Großwindkraftanlagen der MW-Klasse

IEC Windklassen

- IEC (International Electrotechnical Commission) definiert Windklassen (IEC I bis IV)

IEC-Klasse	I	II	III	IV
Extremwert in m/s	50	42,5	37,5	30
Durchschnittswert in m/s	10	8,5	7,5	6

- Ein zusätzlicher Buchstabe (a, b oder c) gibt den Turbulenzgrad (18%, 16%, 14%) an



Schnellaufzahl

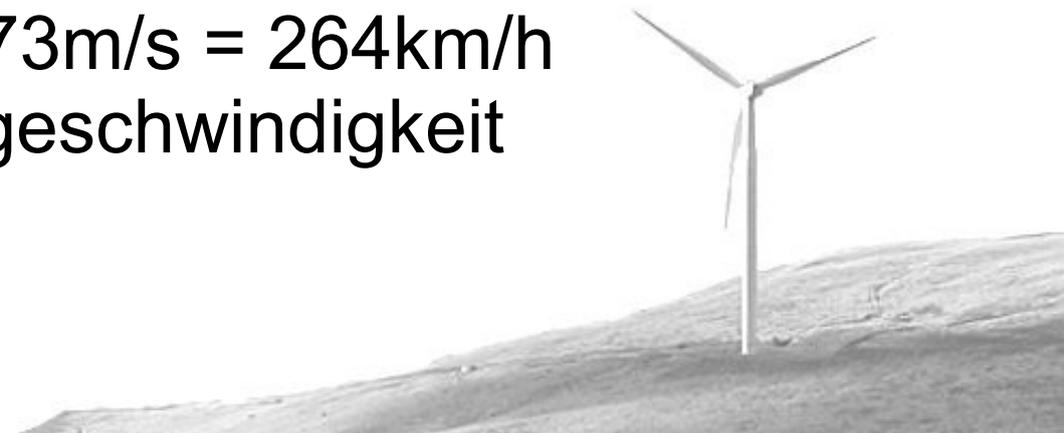
$$\lambda = \frac{\text{Umfangsgeschwindigkeit}}{\text{Windgeschwindigkeit}}$$

$$r = 35\text{m}, n = 20\text{rpm}$$

Langsamläufer

→ Umfangsgeschwindigkeit 73m/s = 264km/h
bei 10m/s = 36km/h Windgeschwindigkeit

$$\rightarrow \lambda = 7,33$$



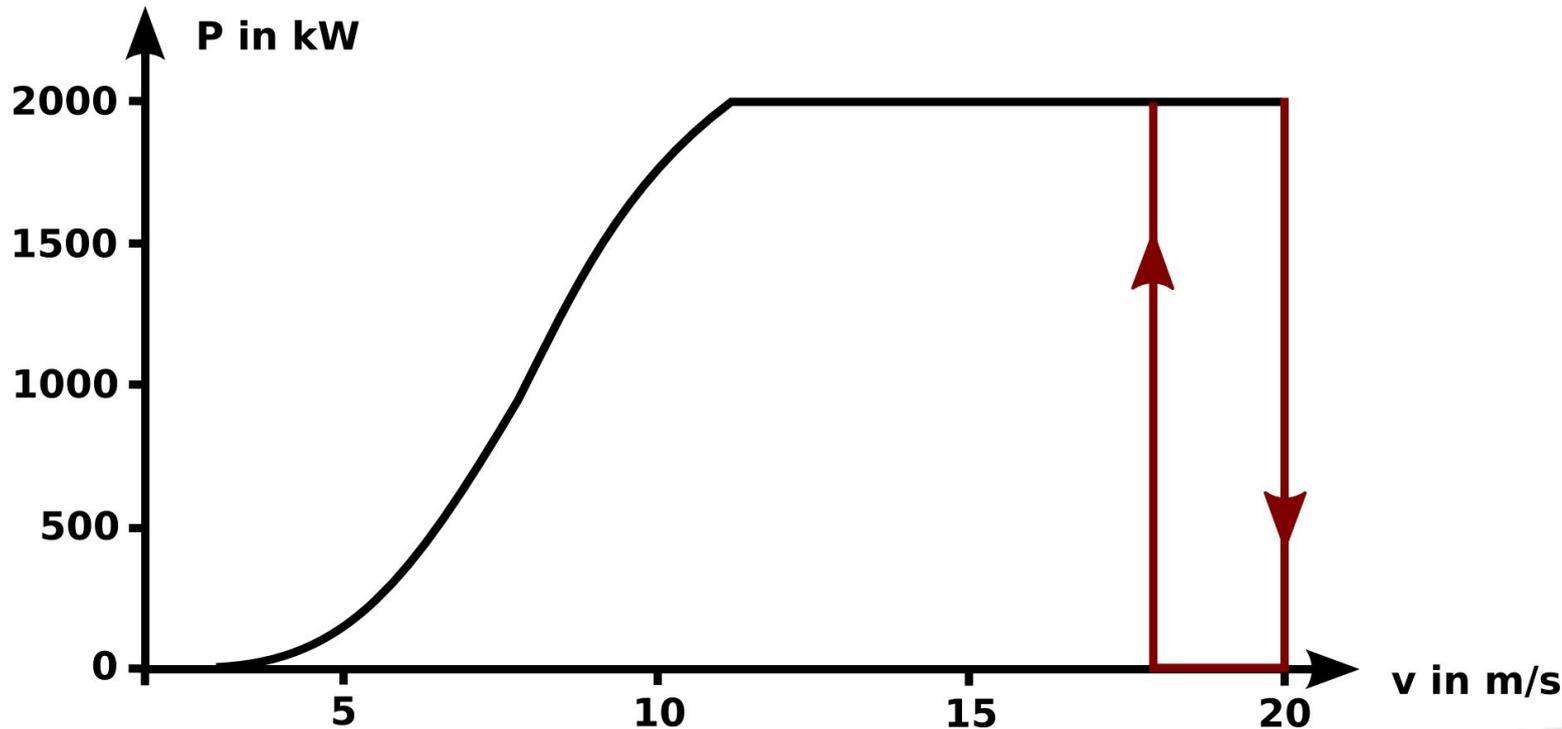
Flügelanzahl

- Theoretisch: $\lim_{n \rightarrow \infty} \textit{Erntegrad} = c_{\textit{Betz}}$
- λ bei mehr Flügelblättern kleiner \rightarrow Leiser, weniger Schwingungen
- ABER: gegenseitige Beeinflussung
- Turmrückstau verursacht Störungen
- $n=3$ hat sich als sehr guter Kompromiss erwiesen
- Offshore auch Zweiflügler denkbar



Drehzahlregelung / Leistungskurve

- Stallregelung: Strömungsabriss bei zu hoher Drehzahl
- **Pitchregelung**: Anstellwinkel der Flügel einstellbar



Aufbau

- Fundament
- Turm
- Turmkopf / Gondel
- Nabe
- Flügel
- Netzübergabestation



Fundament (Gründung)

Untergrundabhängig:

- Flachgründung bei festem Boden
- Tiefengründung (Pfahlgründung) bei lockerem Untergrund
- Verankerung im Offshorebereich wie bei Ölplattformen



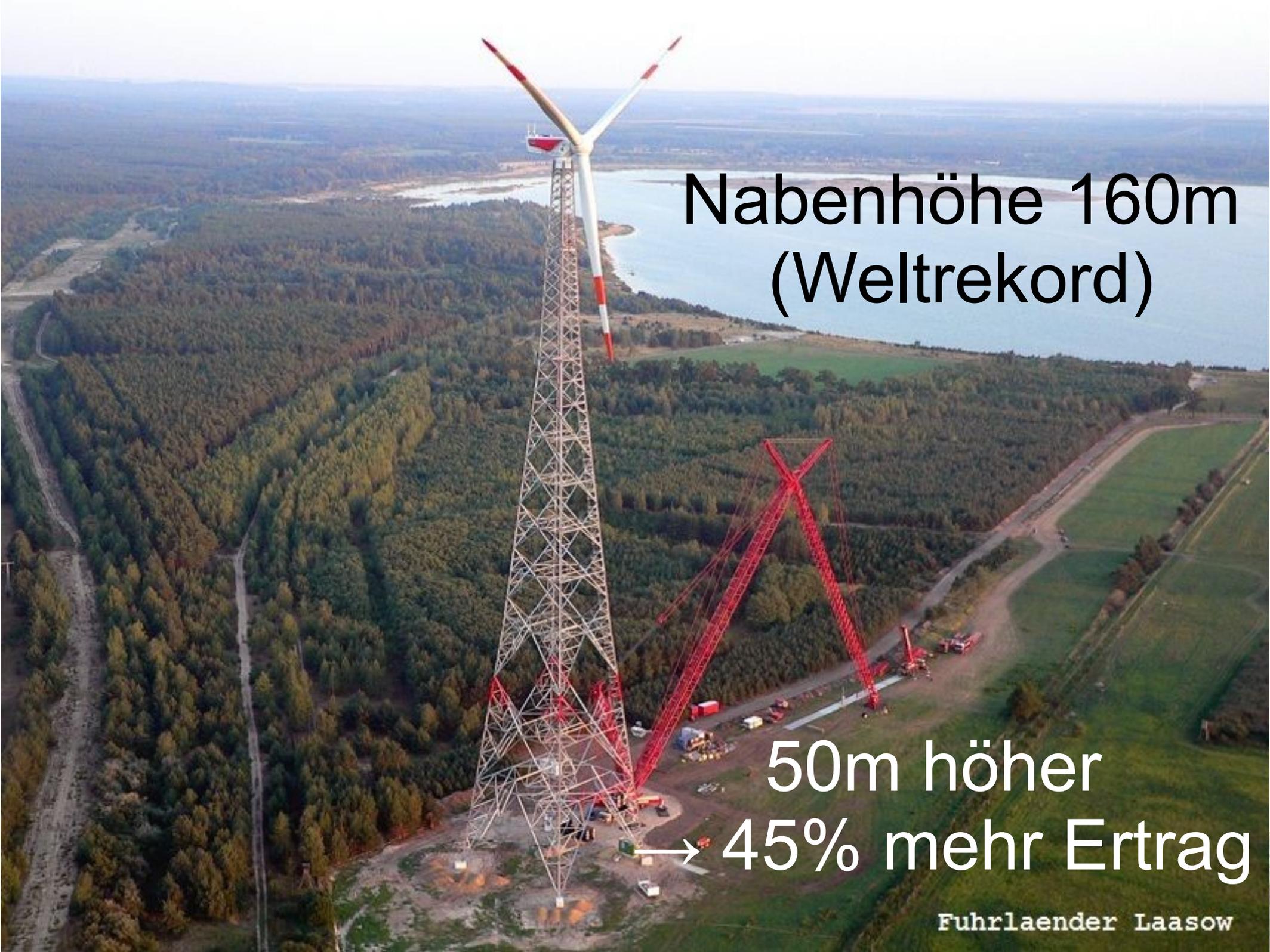
Turm

- Muss enormen Belastungen standhalten
- Höhe 50 bis 160m
- Stahl oder Beton
- Oft auch Hybrid
- Auswahl stark von Transportmöglichkeiten abhängig



Gitter- und Rohrturm





Nabenhöhe 160m
(Weltrekord)

50m höher
→ 45% mehr Ertrag

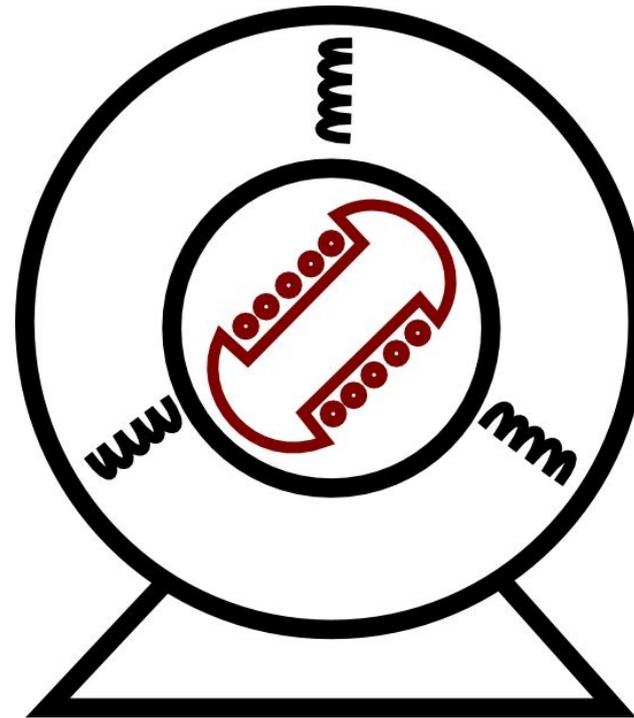
Fuhrlander Laasow

Drehstrom-Asynchrongenerator

Drehzahldifferenz \rightarrow Schlupf

Magnetfeld im Läufer \rightarrow induziert Spannung

2 Polpaare: 1500u/min Nenndrehzahl für 50Hz



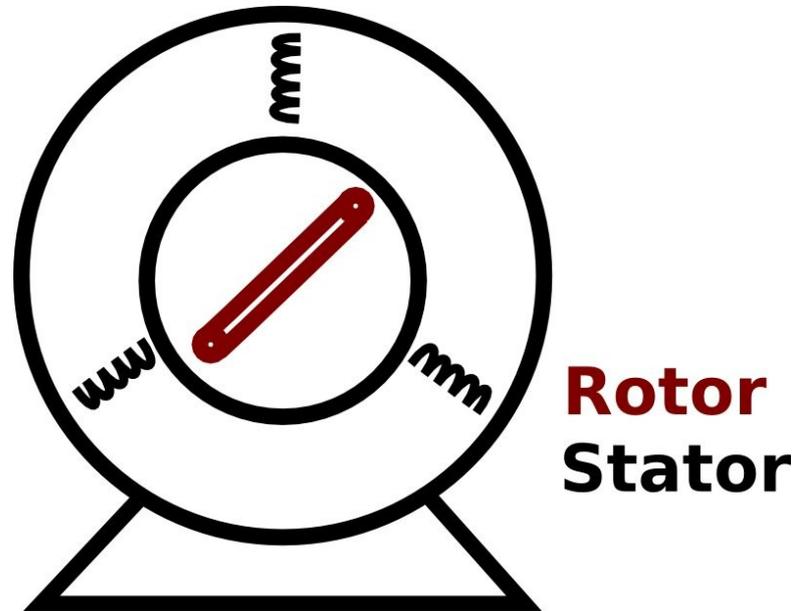
Rotor
Stator

- + Kostengünstig, robust, wartungsarm
- Benötigt Blindleistung für Läufererregung



Synchrongenerator

Läuferfeld elektrisch oder durch Magnete erzeugt
→ Keine Drehzahldifferenz



- + Leistungsfaktor einstellbar
- + Effizienter als Asynchronmaschine
 - Komplexerer Aufbau
- Seltene Erden für Permanentmagnete

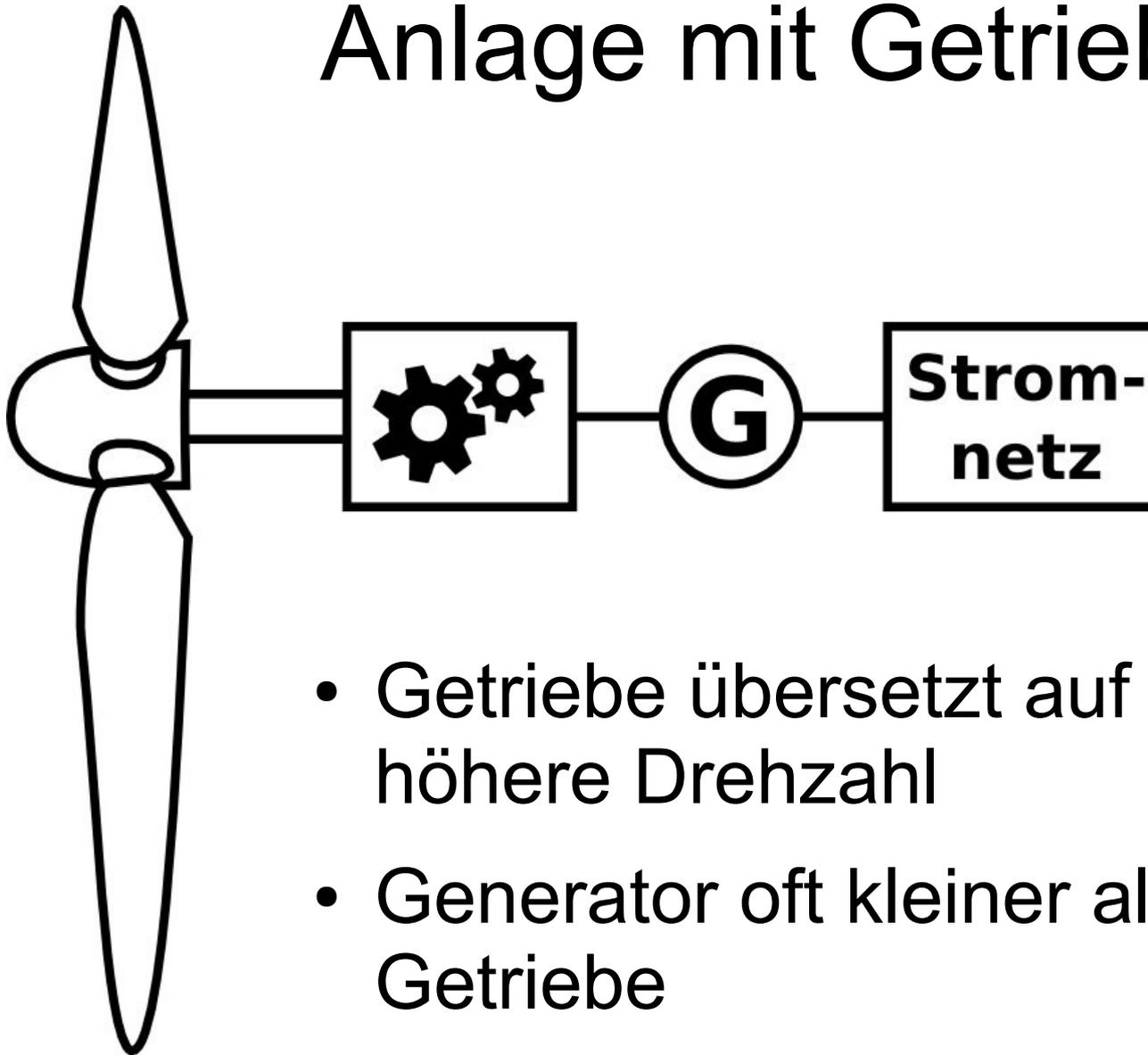


Turmkopf

- Wird dem Wind nachgeführt
- Bei großen Anlagen mit Hubschrauberlandeplatz
- Komponenten können auch in Turmfuß ausgelagert werden
- Unterscheidung zwischen getriebelosen Anlagen und Anlagen mit Getriebe



Anlage mit Getriebe



- Getriebe übersetzt auf höhere Drehzahl
- Generator oft kleiner als Getriebe
- Bewährte Komponenten einsetzbar



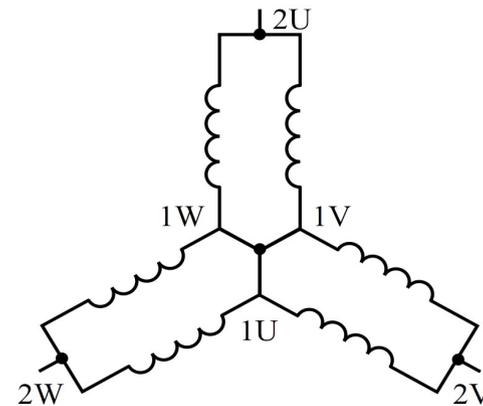
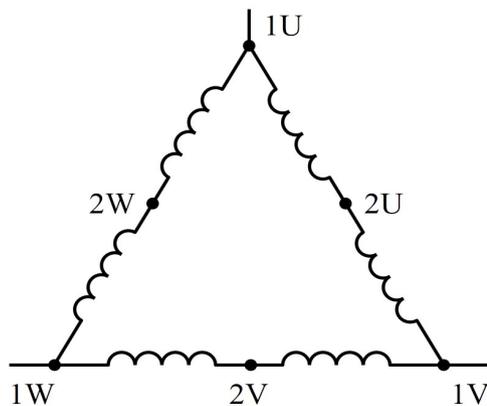
Anlage mit Getriebe II



Maschinenhaus mit
Getriebe und Generator

Erzeugung der 50/60 Hz Netzfrequenz

- Asynchronmaschine mit 2 Polpaaren:
1500u/min für 50Hz Netzfrequenz
- Mit Dahlanderschaltung kann die Polpaarzahl verdoppelt werden (\rightarrow 750u/min für 50Hz)



\rightarrow Zwei Betriebspunkte

- Drehgeschwindigkeit muss konstant gehalten werden: **Schlechte Netzverträglichkeit \rightarrow Veraltet**



Netzfrequenz II

Doppelt gespeiste
Schleifringläufer- Asynchronmaschine:
Läuferfeld von einem Frequenzumrichter erzeugt:

$$f_{\text{Netz}} = n \cdot ppz + f_{\text{Läufer}}$$

→ 50Hz Ausgangsfrequenz über einen weiten
Drehzahlbereich



Netzfrequenz III

Kaskadenmaschine

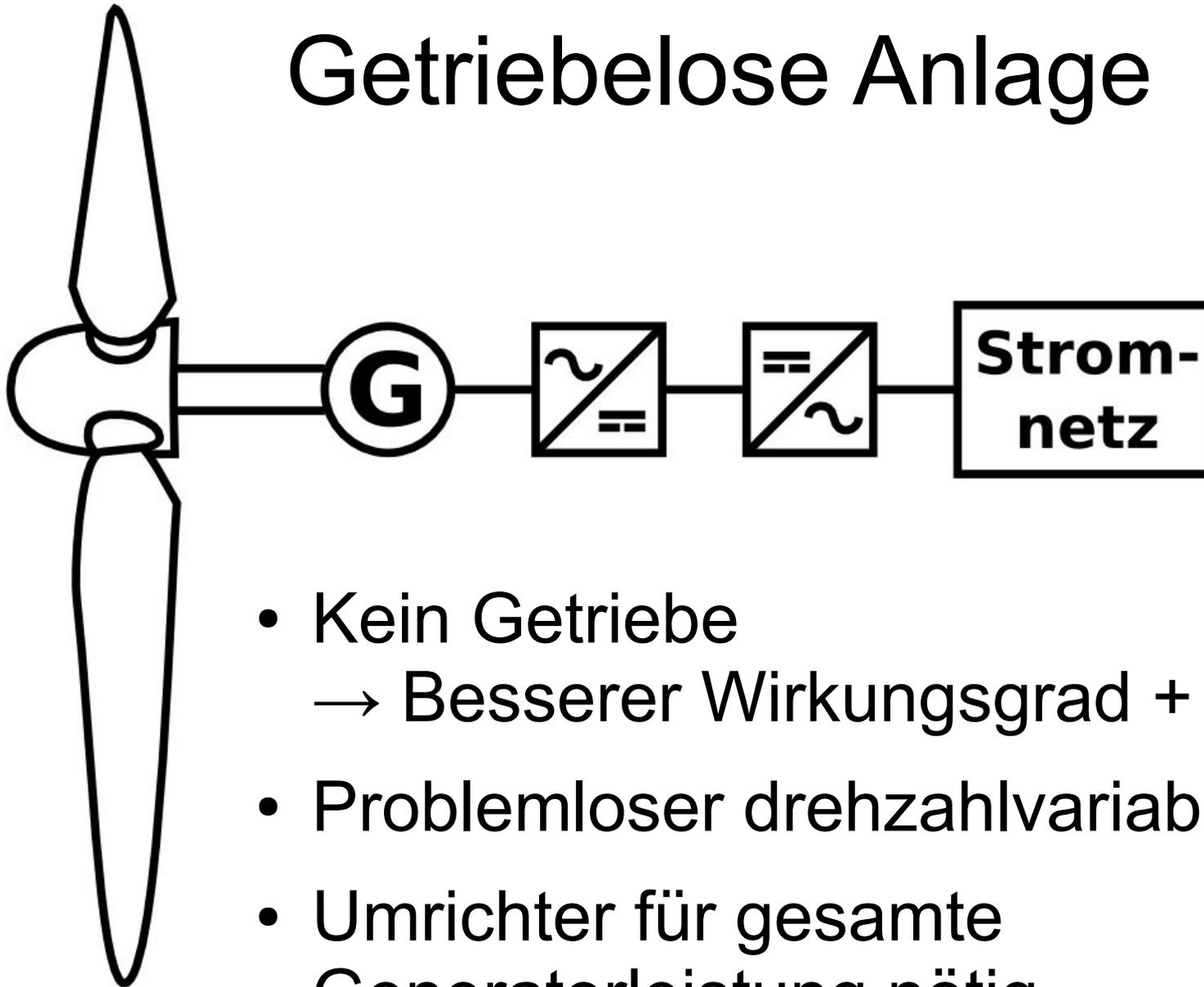
(Bürstenlose Doppeltgespeiste Induktionsmaschine)

2 Asynchrongeneratoren mit gemeinsamem Läufer
Frequenzumrichter für einen Teilgenerator

- + Keine Schleifringe
- Geringere Leistungsdichte
- Noch nicht ganz ausgereift



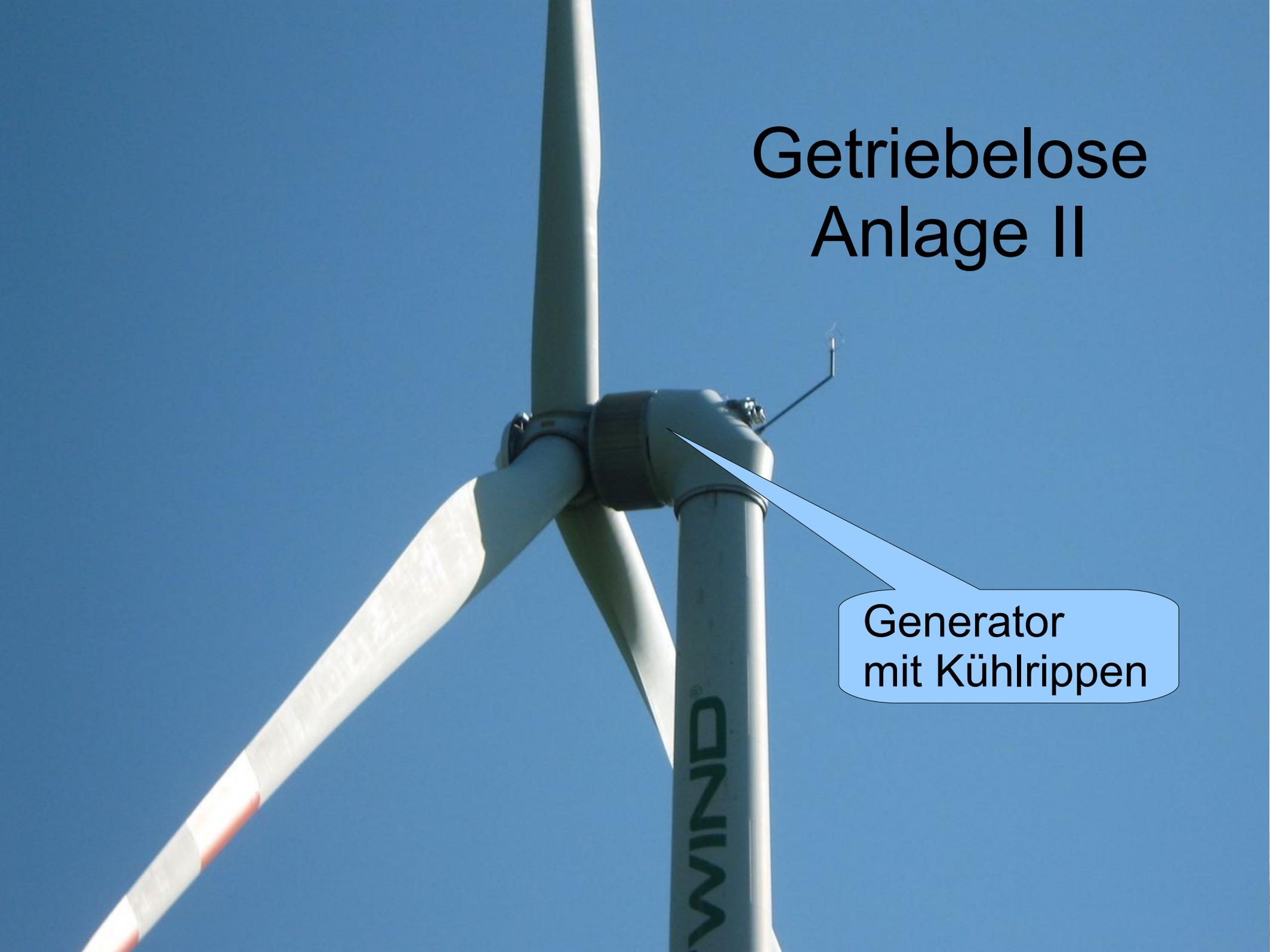
Getriebebelose Anlage



- Kein Getriebe
→ Besserer Wirkungsgrad + leiser
- Problemloser drehzahlvariabler Betrieb
- Umrichter für gesamte Generatorleistung nötig
- Turmkopf schwerer



Getriebelose Anlage II



Generator
mit Kühlrippen

Nabe

- Verbindet Turmkopf und Flügel
- Enthält Pitchsystem
- Schweißkonstruktion oder Sphäroguss



Details Turmkopf + Nabe

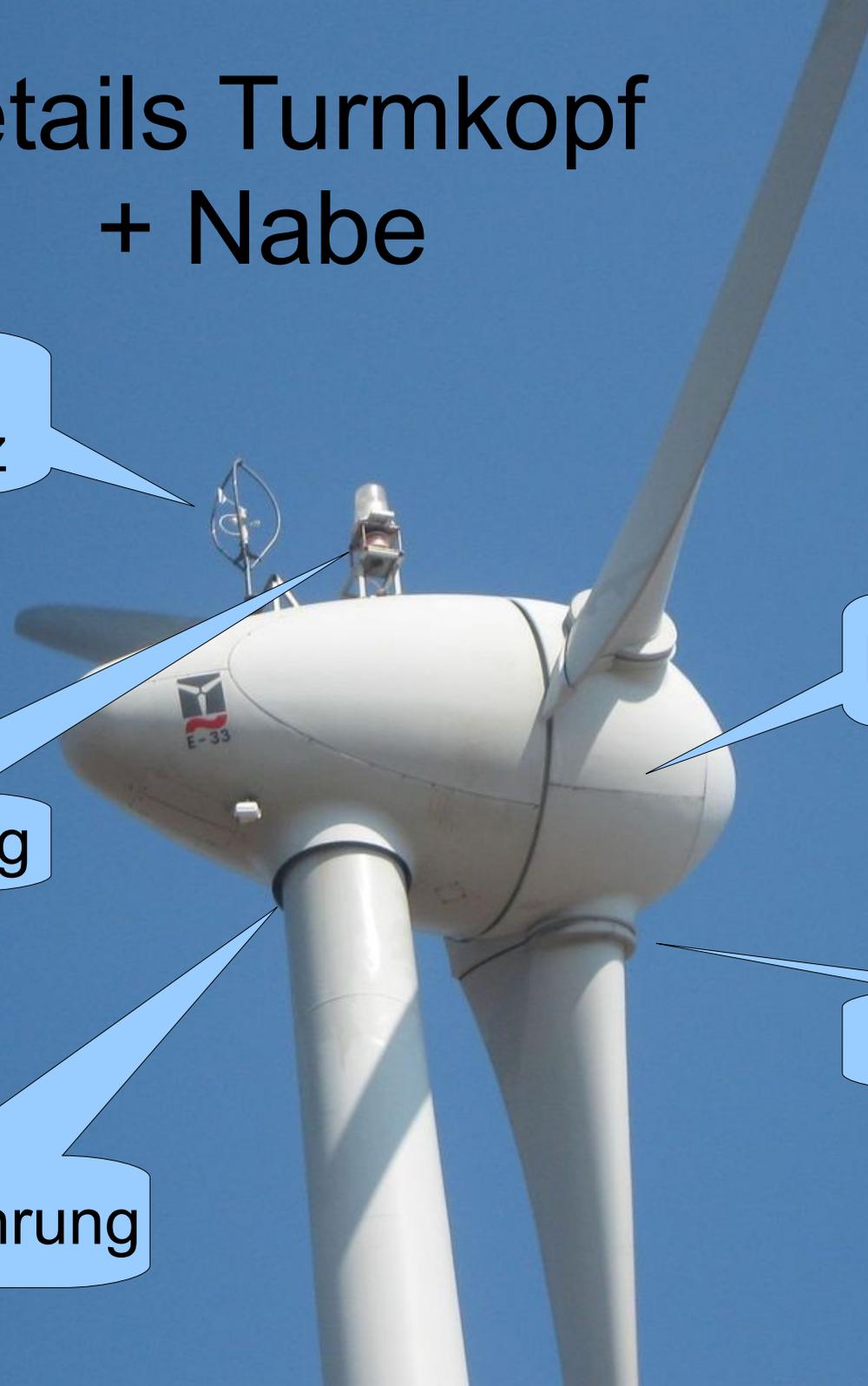
Anemometer
mit Blitzschutz

Flugbefeuerung

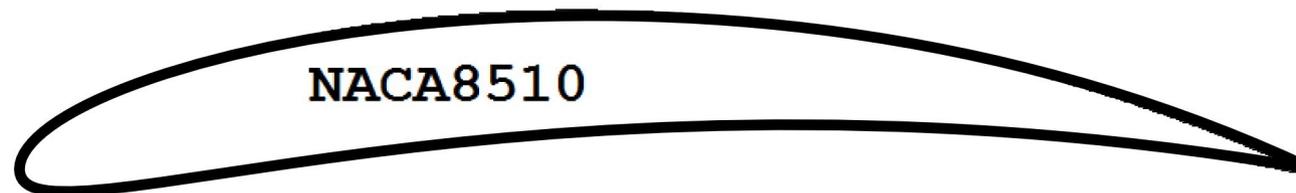
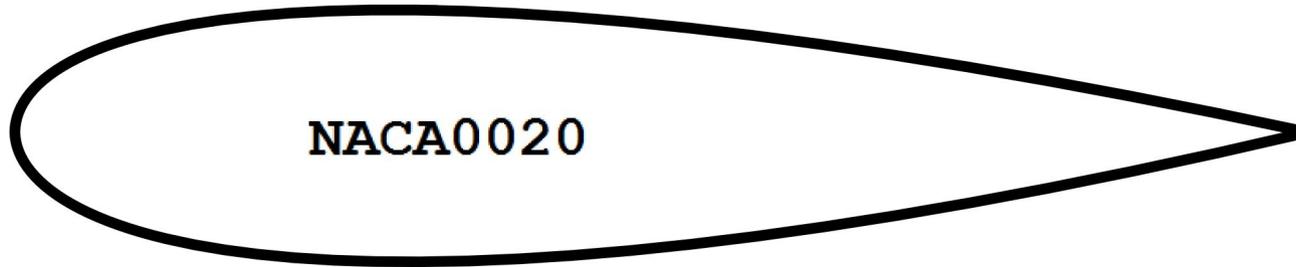
Windnachführung

Nabe

Pitchgelenke



NACA-Profil



z.B. 4-Digit NACA: NACAxyzz

x.. Profilwölbung

y.. Wölbungsrücklage

zz.. Dicke



Flügel (Rotorblätter)

- GFK / CFK / Stahl / Aluminium
- Länge 30 bis 60m, auch teilbar für Transport
- 5 bis 20t Gewicht



Zuverlässigkeit

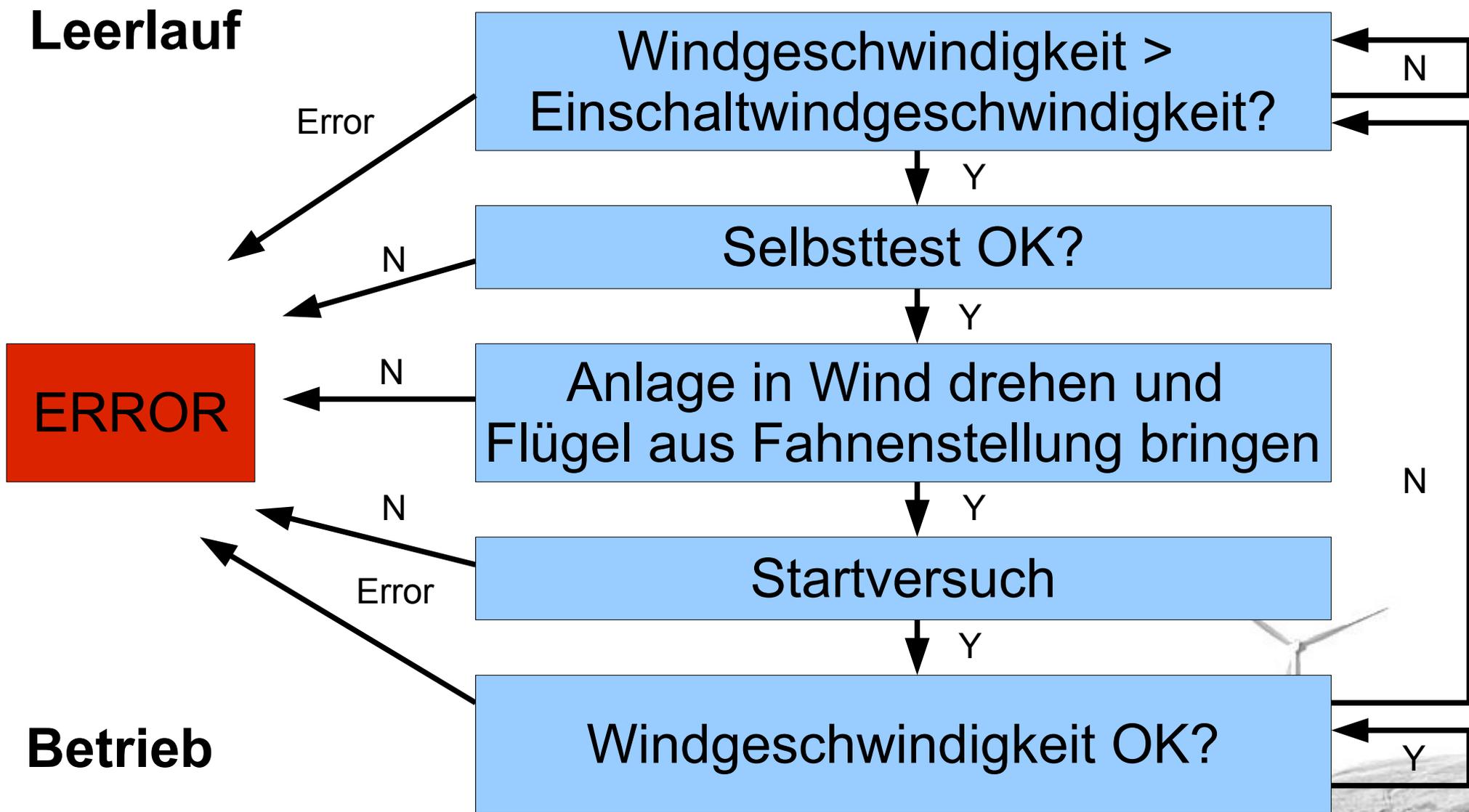
- Ausgelegt auf 20-30 Betriebsjahre
- >95% Verfügbarkeit

Regelmäßige Wartung vorausgesetzt

Fuhrlander Burbach

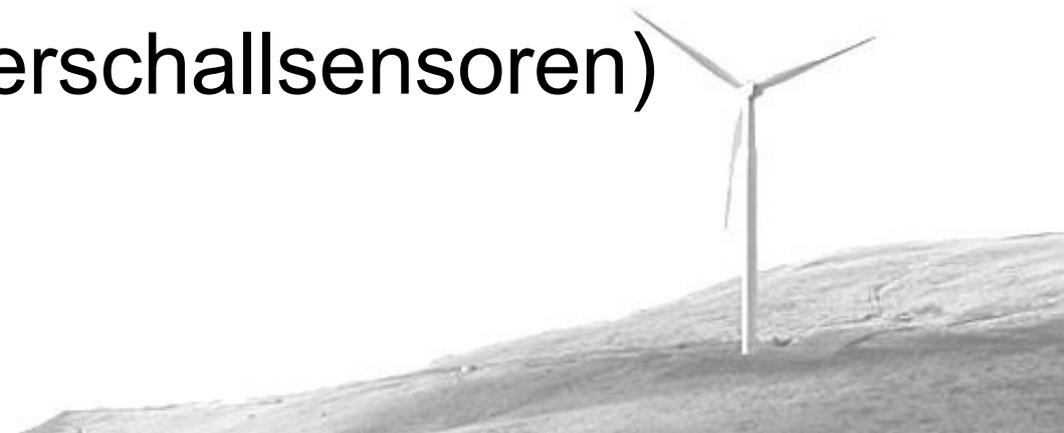


Betriebsablauf: Anlage Aktiv



Sensoren

- Anemometer
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Turm- und Flügelschwingungen
- Drehzahl und Rotorposition
- Pitchwinkel, Yawwinkel
- Ströme + Spannungen
- Anlagenzustand (Körperschallsensoren)
- ...



Steuerungssystem

- PLCs (SPS) oder PC-based Control
- SCADA
(Supervisory Control and Data Acquisition)
- Anbindung an Internet
- GSM-Verbindung, SMS-Benachrichtigung bei Störungen
- Windparkmanagementsysteme



Windpark

- + Kostengünstiger Bau, Betrieb und Wartung
 - + Weniger Umwelteingriff durch Zufahrtswege
 - + Gemeinsame Netzübergabestation
 - + Gemeinsame Genehmigung
-
- Anlagen beeinflussen sich, Wake-Effekt
 - Mindestabstand notwendig,
Softwareoptimierung möglich

Standortauswahl

- „Nachbar hat auch eine“
- „Es weht immer der Wind“
- + Windsimulationen
- + Lanzeitwindmessung (>1Jahr)
 - Messturm (>2/3 geplante Nabenhöhe)
 - SODAR (**S**onic **D**etecting **A**nd **R**anging)
 - Drohnen



Offshore?

- + 3800 Vollaststunden/Jahr (laut "alpha ventus")
vs. 2000 – 2500 Stunden/Jahr an Land
- + Größere Anlagen möglich
- + Keine Nachbarn

- Probleme mit Korrosion
- Langer Netzanschluss
- Deutlich teurere Anlagen
- Behinderung der Schifffahrt

Wenige verlässliche Daten verfügbar



Andere Standorte

Tropisch

- Bis zu 100% Luftfeuchtigkeit (kondensierend)
- Hohe Temperaturen
- Klimaschwankungen
- Sandstürme, Starkregen

Kaltes / arktisches Klima

- Kaltzähe Materialien
- Enteisung wenn notwendig
- Schaltschrankheizung



Probleme und Gefahren

- Ästhetische Probleme, „Landschaftsverbrauch“
- Schattenwurf und Reflexionen
- Lärmbelästigung
- Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen
- Offshore – Standorte
- Elektromagnetische Beeinflussungen
- Eiswurf



Ästhetische Probleme

- „Auflösung“ menschliches Auge:
~1 Bogenminute ($1/60^\circ$)
→ 4m dicker Turm aus 13,75km noch sichtbar
→ Realer Wert hängt vom Kontrast ab
Gittertürme weniger weit sichtbar
- Blattspitzen müssen markiert werden
(Flugverkehr)
- „Schönheit“ kann nicht bewertet werden



Schattenwurf und Reflektionen

- Gleichmäßige Abschattung stört wenig
- Abschattung durch bewegte Objekte (Flügel) sehr unangenehm
 - Situationsabhängige Abschattung und Abstände zu Wohnhäusern einhalten
- Hindernisbefeuerung an Sichtweite angepasst
- Reflexionsarme Beschichtungen



Lärmbelästigung

- Äquivalente Schalleistung 90-120dB(A)
- Nahezu unabhängig von Anlagengröße
- In 300-500m <45dB(A)
- In den meisten Betriebspunkten von Windgeräuschen überdeckt
- Lärmreduzierter Betrieb möglich
- Infraschallemissionen bei großen Anlagen stärker, aber immer deutlich unter Grenzwerten



Gefährdung von Vögeln und Fledermäusen

- Kontroverses Thema, Beeinflussung unbestritten
- „Opferzahlen“ von 0,5 bis 4 (10) Vögel pro Anlage pro Jahr
- Fledermäuse sehr gefährdet, vermutlich wegen erhöhter Insektendichte um WKAs
- Wildtiere werden angeblich verjagt
- Gewisse Tierarten vermehren sich
- Neue WKAs haben niedrigere Blattgeschwindigkeiten



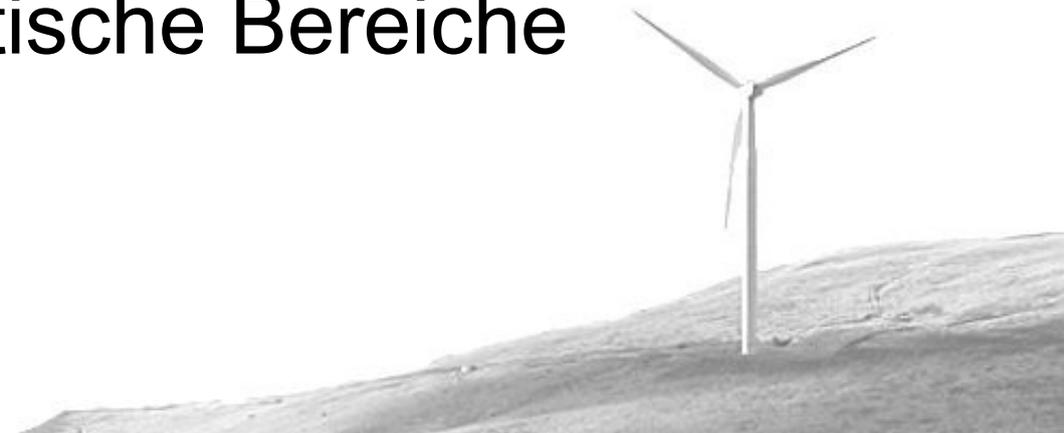
Offshore – Standorte

- Sehr wenige Daten
- Lärmbelästigung bei Bau und Betrieb
- Fundamente dienen als „künstliche Riffe“
- Hochspannungsleitungen vermutlich problematischer



Elektromagnetische Beeinflussungen

- Radio + Fernsehempfang kann gestört werden
- Windkraftanlagen können als false positives auf Radaranlagen auftauchen
 - Sperrgebiete um kritische Bereiche



Eiswurf

- Bei bestimmten Klimasituationen kann sich Eis an exponierten Stellen bilden
- Eisbrocken können herunterfallen oder weggeschleudert werden
- Keine Opfer bekannt, nur Sachschäden
- Eisbelag reduziert massiv die Leistung
- Blattheizung nicht immer wirtschaftlich



Weitere Gefahren

- Brände in Gondel schwer zu löschen
- Strukturelles Versagen extrem selten
→ Sieht aber spektakulär aus
- Haftpflichtversicherung WKA 1-2MW:
<100€/Jahr





Ende Technikteil

Besonderer Dank an:

Fuhrländer AG für die schönen Bilder

Energierücklaufzeit

= Zeit, in der die Anlage die zu ihrer Herstellung aufgewendete Energie „produziert“

- Windkraftanlage: max. 6 Monate
guter Standort: 2 Monate
- Photovoltaik: > 2 Jahre
- Fossile Brennstoffe: Nie



€€€

- Anlagenkosten
 - ~1000-2000€ pro kW Nennleistung
 - 1MW-Anlage (versch. Anbieter) 1 Mio. €
 - Enercon E-126 (7,5MW) ca. 11 Mio. €
- Offshore teurer, vor allem wegen Fundament
- Netzanschluss: 10.000-100.000€/km



Energiekosten

- Moderne Anlage an gutem Standort: 4-6ct/kWh
- Anlagenpreise sind eher gestiegen → 8ct/kWh
- Wasserkraft etwas billiger, aber ausgeschöpft
- Photovoltaik: 30-50ct/kWh
- Solarthermie: 20ct/kWh
- Fossile Brennstoffe: Sehr stark schwankend, 4 bis 15ct/kWh
- Kernkraft: Keine verlässlichen Angaben (1,5 bis 30ct/kWh)



Planungssicherheit

- Wind weht nicht immer
- Vorhersagen im Flachland recht zuverlässig
- In bergigen Regionen wesentlich schwieriger
- Windkraftanlagen sind nicht in die aktive Netzregelung einbezogen
 - Liefern Strom wenn möglich
- Lastschwankungen müssen abgedeckt werden
 - Schnell verfügbare Reserve:
Pumpspeicherkraftwerke, Gasturbinen



Planungssicherheit II

- Probleme durch Energietransport (Überlastung)
- Moderne Anlagen haben sehr gute Netzverträglichkeit
- Low-voltage-ride-through
- „Großer Blackout“ durch Windenergie vorhergesagt
- Kritische Situation: Orkan in Windpark



Zahlen

- Gesamtstromverbrauch
Deutschland 600 TWh/Jahr
- Windkraftanteil: DE 6,5%, AUT 3%, EU 4,8%
- Installierte Windkraftleistung in DE ca. 200GW,
21.000 Anlagen
- 2011: 1800MW prognostiziert
1. Halbjahr 2011: 356 Anlagen, 793MW
- Potential Offshore-Windkraft sehr groß



GROWIAN

GROsse
WindkraftANlage

1983-1987

3MW

$d = 104,4\text{m}$

$h = 100\text{m}$

Leeläufer (!)

Nur 420

Betriebsstunden bis
Stilllegung



Foto: Heiner Dörner

<http://www.heiner-doerner-windenergie.de/>

Growian II

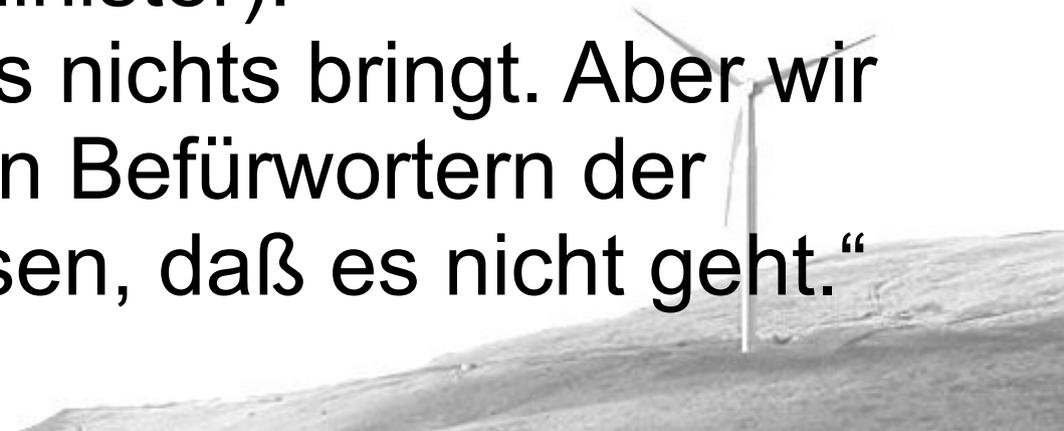
Günther Klätte (Vorstand RWE):

„Wir brauchen Growian, um zu beweisen, daß es nicht geht“

„daß Growian so etwas wie ein pädagogisches Modell sei, um Kernkraftgegner zum wahren Glauben zu bekehren“

Hans Matthöfer (SPD Forschungs- und Finanzminister):

„Wir wissen, daß es uns nichts bringt. Aber wir machen es, um den Befürwortern der Windenergie zu beweisen, daß es nicht geht.“



Ende



Links

<http://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>

http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Windenergienutzung

http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Windkraftanlagenherstellern

<http://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Synchronmaschine>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Asynchronmaschine>

<http://www.ppart.de/aerodynamics/profiles/NACA4.html>

<http://de.wikipedia.org/wiki/NACA-Profil>

<http://de.wikipedia.org/wiki/GROWIAN>

<http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13514476.html>

Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit
Springer ISBN 3540721509 (sehr dick + teuer)

