

WWK V8: Betrieb, Ertragsprognose / Material und Energiebilanz

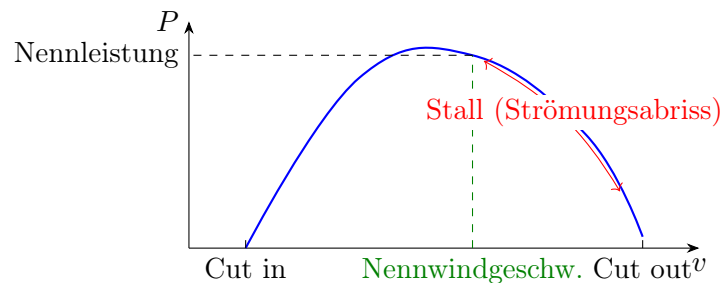
Video 1: WKA regeln, Stall und Pitch

1. **Regelung auf max. Leistung** (MPPT = Maximum Power Point Tracking)
 - 1.1. Stall-Regelung (traditionell/veraltet)
 - 1.2. Pitch-Regelung
2. **Windrichtungsnachführung** (ca. 2-3 Umdrehungen)
3. **Systemdienstleistungen**: Blindleistungseinspeisung, Drosselung...
4. **Schattenwurf, Lärmbelästigung, Eiswurf, Vogelschlag**

1.1 Stall-Regelung

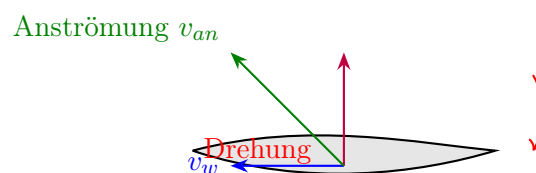
- Feste Blätter
- Asynchrongenerator direkt am Netz
 - ↔ Drehzahl kaum flexibel (Schlupfläufer)
 - ↔ Bei ASE schnellere Drehzahl, als das Netz
 - ↔ Schnelllaufzahl (λ) im Allgemeinen \neq Auslegungsschnelllaufzahl
- **Frage**: Verhalten bei hoher Windgeschwindigkeit \Rightarrow mehr Leistung?

Leistungskurve



- **Warum Stall?** Weil der Rotor mit \sim fester Geschwindigkeit dreht (durch Generator-Bremsmoment vorgegeben), aber der Wind schneller wird \rightarrow Verlust des Auftriebs.
- **Was ist der Cut in?** (Einschaltgeschwindigkeit) Die niedrigste Windgeschwindigkeit, bei der Leistung eingespeist wird.
- **Cut out?** Bei ca. 25 m/s wird die Anlage abgeschaltet.

Skizze zum Abriss des Auftriebes am Rotorblatt



- **Resultat**: Der Winkel der Anströmung wird steiler \rightarrow Strömungsabriss \rightarrow Bremsung \rightarrow Leistungsverringerung.

→ **Vorteile:** Mechanisch einfach (Blätter fest), Elektrisch einfach (ASG).

→ **Nachteile:** Keine optimale Ausbeute, Belastung des Netzes (Böen).

1.2 Pitch-Regelung

→ Die Rotorblätter sind verstellbar.

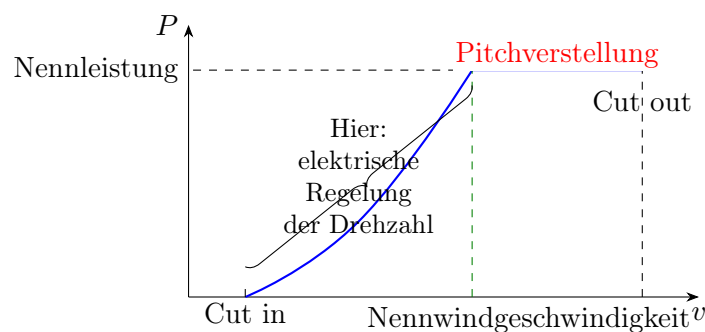
→ Synchrongenerator mit Umrichter oder doppeltgespeister Asynchrongenerator.

↔ Flexible Drehzahl

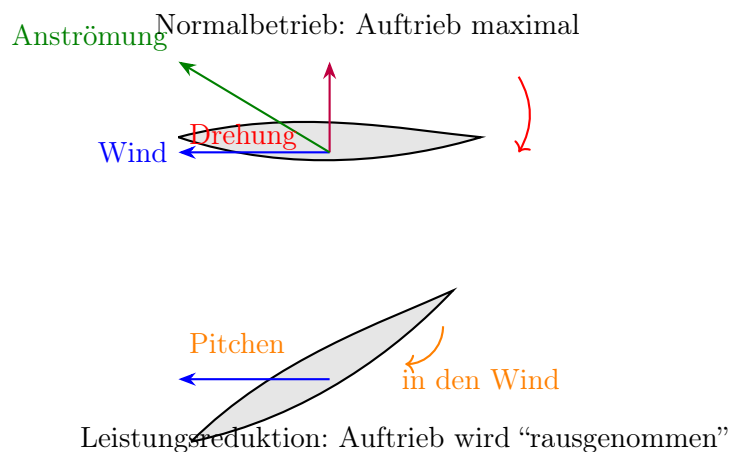
↔ Schnelllaufzahl = Auslegungsschnelllaufzahl (über weite Strecken)

→ P-Regelung oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit durch Blattverstellung.

Leistungskurve



Skizze des Rotorblatts (Pitch)



→ **Vorteile:** Optimale Leistungsausbeute (Auslegungsschnelllaufzahl), Systemdienstleistungen an das Netz, da die Elektronik in der Anlage verbaut ist.

→ **Nachteile:** Besserer Generator nötig + Elektronik (Umrichter), Mechanisch aufwändige Blattverstellung.

Elektrische Regelung (zwischen Cut in und Nennwindgeschwindigkeit)

→ **Elektrisch erregter Synchrongenerator (EESG):** Erregung und Umrichter.

→ **Permanenterregter Synchrongenerator (PMSG):** Nur Umrichter.

→ **Doppeltgespeister Asynchrongenerator (DFIG/DGASG):** Umrichter bei der Rotor-speisung.

⇒ Optimale Schnelllaufzahl

⇒ Regelung anhand der Windgeschwindigkeit oder der Drehzahl.

Video 2: Ertragsprognose für eine WKA

→ Prognose des Jahresenergieertrags in MWh (Energie) oder in MW/a (mittlere Leistung).

→ **Jahresnutzungsgrad** (Capacity Factor) → Wie viel Prozent der Kapazität nutze ich eigentlich über das Jahr gemittelt?

$$\text{Jahresnutzungsgrad} = \frac{\text{Jahresenergieertrag}}{(365 \cdot 24\text{h}) \cdot \text{Nennleistung}}$$

→ **Volllaststunden** ist der Jahresnutzungsgrad aufs Jahr bezogen.

$$\text{Volllaststunden} = \frac{\text{Jahresenergieertrag}}{\text{Nennleistung}}$$

→ Für die Ertragsprognose:

- Leistungskurve P über v (vom Hersteller)
- Windstatistik p über v

→ **Wie kommt man zur Leistungskurve?**

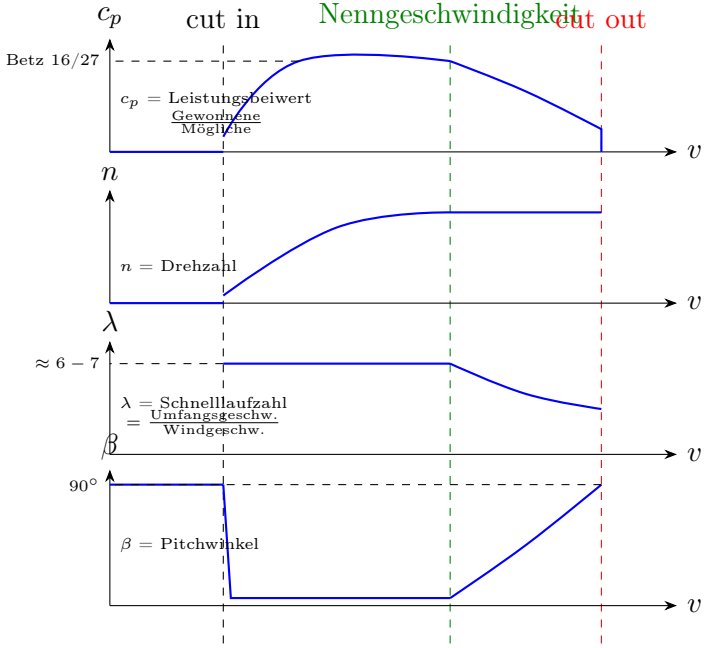
1. Datenpunkte sammeln (10min / v und P)
2. In "Binsenteilen" (Zusammenfassung von Datenpunkten in 0,5 m/s Säulen) und mitteln.

→ **Wie komme ich zur Windstatistik?**

- Tabelle/Balken aus 10-min Mittelwerten von v über $p(v\%)$
- Näherung durch Weibull-Verteilung: $P(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$
(Formparameter k und Skalenparameter A)
- oder Näherung durch Rayleigh-Verteilung → Weibull $k=2$

→ Um einen guten Jahresnutzungsgrad zu erhalten ⇒ Kleinerer "Motor- Kleinere Nennleistung

Video 3: Regelung einer WKA: Leistung, Drehzahl, Pitchwinkel



Video 4: Energiebilanz von Windenergie

- Lohnen sich WEA energetisch?
- Was ist die CO₂-Bilanz?
- Was sind die wesentlichen Materialien?

Begriffe

- **Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz):** Alle Umweltwirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung/Recycling. (Tiere, CO₂, Wasser...)
- **Energiebilanz:** Wie viel und welche Energie wird eingesetzt (Graue Energie) vs. welche/was wird gewonnen?

Video 5: Der Erntefaktor als dehnbare Kennzahl

- **Erntefaktor:** Wie viel SZinsen auf die Energie erhalte ich? (Energy Returned on Energy Invested)

$$\text{Erntefaktor} = \frac{\text{gewonnene Energie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$

- **1. Problem: Welche Energie?** kWh elektrisch oder kWh Primärenergie (Faktor 3)?
 - Bsp: AKW 2-100, Kohle/Gas 20-30, Wind 20-80 (Standort), PV 3-10

- **Trick, um Erntefaktor groß zu machen:** Primärenergetische bewertete Erntefaktor

$$= \frac{\text{gewonnene Energie in Primärenergie umgerechnet (meist Faktor x3)}}{\text{aufgewendete Energie (als Primärenergie)}}$$

- wegen Umwandlungsverluste

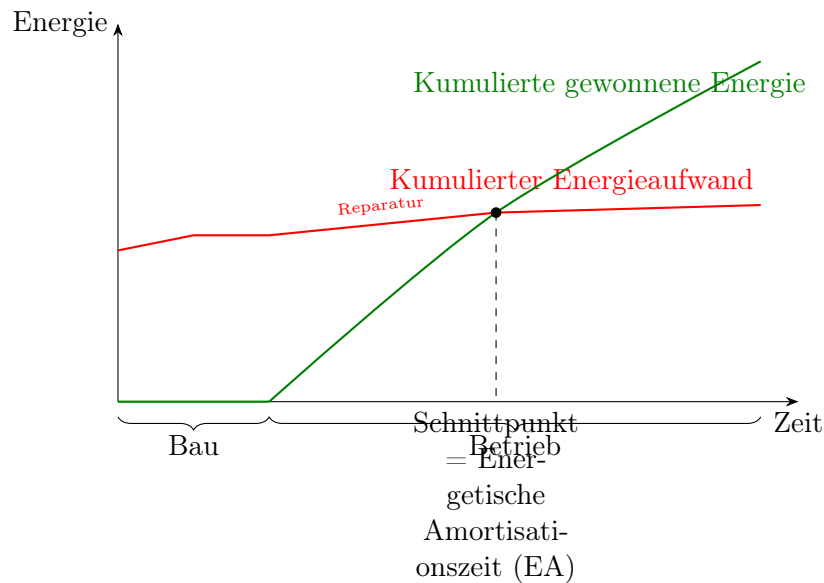
- **2. Problem: Gute vs. schlechte Energie** (welche Parameter?)

- Thermisch vs. elektrisch
- Verfügbar vs. fluktuierend
- Fluktuierend wie lösen? → Speicher
- Überkapazität → Erntefaktor wird geringer

- **3. Problem:** Kohle, Gas eigentlich unter 1 wegen der Umwandlungsverluste. Der Energieträger wird vernachlässigt.

Video 6: Energetische Amortisationszeit (Energy Payback Time)

- Wann hat sich wieder die Energie eingespielt?



→ Vom Erntefaktor (EF) zur Energetischen Amortisationszeit (EA)

$$EA \approx \frac{\text{Lebensdauer}}{\text{Erntefaktor}}$$

→ Bsp. Wind: Lebensdauer 20a, EF 20-80 → EA ≈ 1 Jahr

→ Was ist mit **Repowering**? Abbau alter Anlagen für neue → Nicht so großer zusätzlicher Aufwand.

Video 7: Neodym in Windturbinen

→ Metalle der Seltenen Erden

- **Neodym-Eisen-Bor**: Für starke Permanentmagneten
- **Dysprosium (4%)**: Hitzebeständigkeit

→ **Problem**: Schäden an Mensch und Umwelt durch Abbau in China. “Billig”, aber unter schlechten Umweltstandards.

↔ Ironie: Meist wird radioaktives Material frei.

→ **Aber: Nicht jeder Generator!**

1. **AS-Generator mit Getriebe** (traditionell)
2. **Doppeltgespeister AS-Generator mit Getriebe** (Standard)
3. **S-Generator ohne Getriebe mit Umrichter** (Trend)
 - elektrisch erregt
 - permanent erregt (Seltene Erden)
4. **Lösung?: S-Generator mit Getriebe und Umrichter** (Kompromiss)