

# Skript zur Vorlesung WWK V8

Betrieb, Ertragsprognose, Material- und Energiebilanz von Windkraftanlagen

Zusammenfassung der Vorlesungsinhalte

29. August 2025

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Regelung und Betrieb von Windkraftanlagen (WKA)</b>	<b>2</b>
1.1	Stall-Regelung (Passive Leistungsbegrenzung) . . . . .	2
1.2	Pitch-Regelung (Aktive Leistungsbegrenzung) . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Ertragsprognose einer WKA</b>	<b>4</b>
2.1	Kennzahlen . . . . .	4
2.2	Grundlagen der Prognose . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Regelungsparameter im Detail</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Material- und Energiebilanz</b>	<b>6</b>
4.1	Energiebilanz und Erntefaktor . . . . .	6
4.2	Energetische Amortisationszeit . . . . .	6
4.3	Materialaspekte: Neodym in Generatoren . . . . .	7

# 1 Regelung und Betrieb von Windkraftanlagen (WKA)

Die Regelung einer Windkraftanlage ist ein komplexer Prozess, der entscheidend für einen effizienten, sicheren und netzverträglichen Betrieb ist. Die Hauptaufgaben der Regelung sind die Maximierung des Energieertrags bei niedrigen bis mittleren Windgeschwindigkeiten und die Begrenzung der Leistung bei hohen Windgeschwindigkeiten, um die Anlage vor Überlast zu schützen. Man unterscheidet hierbei zwei grundlegende, historisch aufeinanderfolgende Regelungsphilosophien: die Stall- und die Pitch-Regelung.

Neben der Leistungsregelung gehören weitere Aspekte zum Betrieb einer WKA:

- **Windrichtungsnachführung:** Die Gondel der Anlage wird aktiv dem Wind nachgeführt (Azimut-System), um den Rotor stets optimal zur Windrichtung auszurichten. Dies geschieht langsam, mit etwa 2-3 Umdrehungen pro Stunde.
- **Systemdienstleistungen:** Moderne WKA tragen aktiv zur Netzstabilität bei, z.B. durch die Einspeisung von Blindleistung oder die gezielte Drosselung der Leistung auf Anforderung des Netzbetreibers.
- **Umweltauswirkungen:** Betriebsaspekte wie Schattenwurf, Lärmbelästigung, Eiswurf im Winter und Vogelschlag müssen bei Planung und Betrieb berücksichtigt und minimiert werden.

## 1.1 Stall-Regelung (Passive Leistungsbegrenzung)

Die Stall-Regelung ist eine ältere, passive Methode zur Leistungsbegrenzung, die vor allem bei Anlagen älterer Bauart zum Einsatz kam.

**Funktionsprinzip** Kennzeichnend für diese Methode sind starr am Rotor befestigte Blätter, deren Anstellwinkel sich nicht aktiv verändern lässt. Die Anlage wird typischerweise mit einem Asynchrongenerator betrieben, der direkt mit dem Stromnetz gekoppelt ist. Dies erzwingt eine nahezu konstante Rotordrehzahl, die durch die Netzfrequenz vorgegeben ist.

Steigt die Windgeschwindigkeit über die Nennwindgeschwindigkeit an, während die Drehzahl des Rotors konstant bleibt, vergrößert sich der Anströmwinkel am Rotorblatt. Ab einem kritischen Winkel kommt es zum gewollten Strömungsabriss (englisch: *Stall*). Der Auftrieb am Blatt bricht zusammen, der Widerstand steigt stark an, und die dem Wind entnommene Leistung sinkt automatisch. Die Anlage bremst sich somit passiv selbst ab. Die typische Leistungskurve einer Stall-geregelten Anlage ist in Abbildung 1 dargestellt.

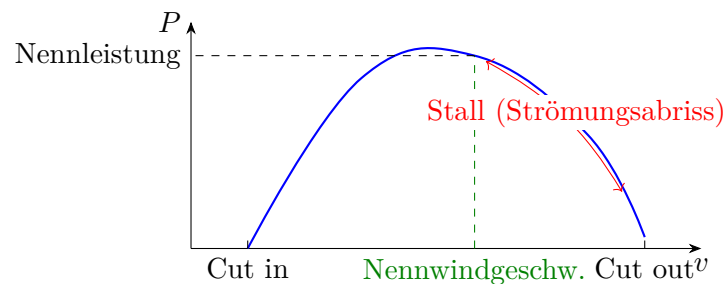


Abbildung 1: Typische Leistungskurve einer Stall-geregelten WKA.

## Vor- und Nachteile

**Vorteile** Die Methode ist mechanisch und elektrisch sehr einfach und robust, da keine beweglichen Teile am Rotorblatt und nur einfache Generatortechnik benötigt werden.

**Nachteile** Die Leistungsausbeute ist nicht optimal, da die Schnelllaufzahl nicht konstant im Optimum gehalten werden kann. Zudem können starke Windböen zu hohen mechanischen Lasten auf der Anlage und zu Leistungsschwankungen im Netz führen.

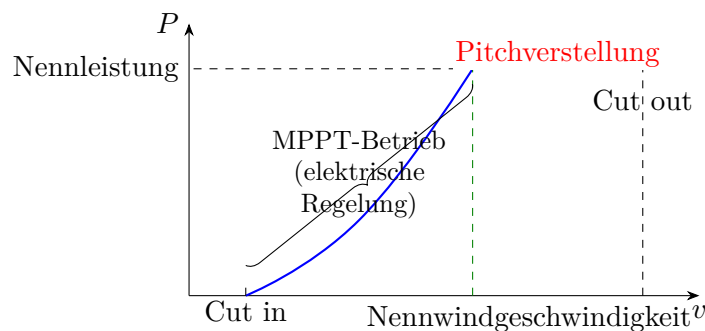
## 1.2 Pitch-Regelung (Aktive Leistungsbegrenzung)

Die Pitch-Regelung ist die heute gängige, aktive Regelungsmethode, die eine wesentlich präzisere Steuerung der Anlage ermöglicht.

**Funktionsprinzip** Bei diesem Verfahren sind die Rotorblätter an der Nabe drehbar gelagert. Ein Stellmotor kann den Anstellwinkel jedes Blattes (den *Pitch-Winkel*) aktiv verändern.

- **Unterhalb der Nennleistung:** Die Blätter werden so positioniert, dass der aerodynamische Auftrieb maximal ist. Die Drehzahl wird elektronisch über den Generator bzw. Umrichter so geregelt, dass die Anlage stets im optimalen Arbeitspunkt (MPPT - Maximum Power Point Tracking) läuft.
- **Oberhalb der Nennleistung:** Sobald die Nennleistung erreicht ist, werden die Rotorblätter langsam aus dem Wind "gedreht". Dadurch wird der Anstellwinkel verringert, der Auftrieb gezielt reduziert und die Leistungsaufnahme auf dem konstanten Nennwert gehalten.

Moderne Anlagen nutzen hierfür Synchrongeneratoren oder doppeltgespeiste Asynchrongeneratoren mit Umrichtern, die einen Betrieb mit variabler Drehzahl ermöglichen. Die charakteristische Leistungskurve mit einem klaren Plateau bei Nennleistung ist in Abbildung 2 zu sehen.



**Abbildung 2:** Typische Leistungskurve einer Pitch-geregelten WKA.

### Vor- und Nachteile

**Vorteile** Die Pitch-Regelung ermöglicht eine optimale Leistungsausbeute über einen weiten Windgeschwindigkeitsbereich und eine präzise Begrenzung der Nennleistung. Dies reduziert die mechanische Belastung und ermöglicht die Bereitstellung von Systemdienstleistungen.

**Nachteile** Das System ist mechanisch aufwändiger (Blattverstellung) und erfordert eine komplexere Leistungselektronik (Umrichter), was die Kosten und den Wartungsaufwand erhöht.

## 2 Ertragsprognose einer WKA

Die Ertragsprognose ist ein zentrales Werkzeug zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines geplanten Windparkprojekts. Sie zielt darauf ab, den zu erwartenden Jahresenergieertrag so genau wie möglich vorherzusagen.

### 2.1 Kennzahlen

Zwei wichtige Kennzahlen beschreiben den Ertrag einer Anlage:

- **Jahresnutzungsgrad (Capacity Factor):** Gibt an, wie viel Prozent der theoretisch maximal möglichen Energie (Betrieb mit Nennleistung rund um die Uhr) tatsächlich erzeugt wird.

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

- **Volllaststunden:** Drückt den Jahresnutzungsgrad in einer anschaulichen Zeiteinheit aus. Sie gibt an, wie viele Stunden die Anlage unter Volllast laufen müsste, um den gleichen Jahresertrag zu erzielen.

$$\text{Volllaststunden} = \frac{\text{Jahresenergieertrag}}{\text{Nennleistung}} = \text{Jahresnutzungsgrad} \cdot 8760 \text{ h}$$

Um einen hohen Jahresnutzungsgrad zu erzielen, ist es oft sinnvoll, eine Anlage mit einer vergleichsweise kleinen Nennleistung (einem "kleinen Motor") an einem windstarken Standort zu errichten.

### 2.2 Grundlagen der Prognose

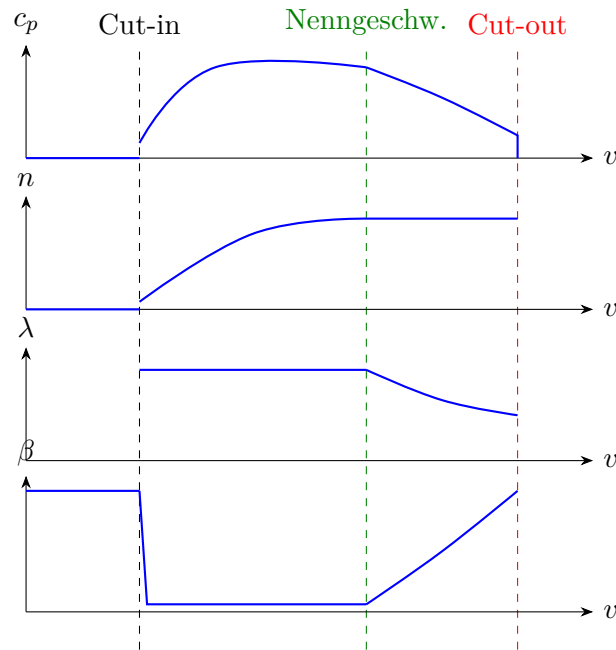
Für eine Ertragsprognose werden zwei wesentliche Datensätze benötigt:

1. **Leistungskurve der WKA:** Diese wird vom Hersteller bereitgestellt und beschreibt, welche elektrische Leistung die Anlage bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit erzeugt ( $P$  über  $v$ ).
2. **Windstatistik des Standorts:** Diese beschreibt die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten am geplanten Standort über ein ganzes Jahr ( $p$  über  $v$ ). Sie wird durch langjährige Windmessungen vor Ort oder durch Windatlanten ermittelt. Zur mathematischen Beschreibung wird häufig die **Weibull-Verteilung** verwendet:

$$P(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

Hierbei sind  $k$  der Formparameter (beschreibt die "Bauchigkeit" der Verteilung) und  $A$  der Skalenparameter (korreliert mit der mittleren Windgeschwindigkeit). Ein Spezialfall ist die Rayleigh-Verteilung mit  $k = 2$ .

Der Jahresertrag wird berechnet, indem für jedes Windgeschwindigkeitsintervall die Leistung aus der Leistungskurve mit der Anzahl der Stunden aus der Windstatistik multipliziert und anschließend über alle Intervalle summiert wird.



**Abbildung 3:** Verlauf der Regelungsparameter einer Pitch-WKA. Von oben nach unten: Leistungsbeiwert  $c_p$ , Drehzahl  $n$ , Schnelllaufzahl  $\lambda$ , Pitchwinkel  $\beta$ .

### 3 Regelungsparameter im Detail

Abbildung 3 zeigt den typischen Verlauf der wesentlichen Regelungs- und Leistungsparameter einer modernen, Pitch-geregelten WKA in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit.

- **Leistungsbeiwert ( $c_p$ ):** Im Teillastbereich wird der  $c_p$ -Wert durch die Regelung auf seinem Maximum gehalten, um die Effizienz zu maximieren. Oberhalb der Nennleistung wird er durch das Pitchen der Blätter aktiv reduziert.
- **Drehzahl ( $n$ ):** Die Drehzahl steigt im Teillastbereich proportional zur Windgeschwindigkeit an, um die optimale Schnelllaufzahl zu halten. Im Nennleistungsbereich wird sie auf ihrem Maximalwert konstant gehalten.
- **Schnelllaufzahl ( $\lambda$ ):** Das Ziel der Regelung im Teillastbereich ist es,  $\lambda$  konstant auf dem Auslegungsoptimum (typ. 6-7) zu halten.
- **Pitchwinkel ( $\beta$ ):** Im Teillastbereich ist der Winkel optimal für maximalen Auftrieb (nahe  $0^\circ$ ). Oberhalb der Nennleistung wird der Winkel erhöht (bis zu  $90^\circ$  bei Abschaltung), um die Leistung zu begrenzen.

## 4 Material- und Energiebilanz

Eine zentrale Frage bei der Bewertung von Energietechnologien ist, ob sie sich aus energetischer und ökologischer Sicht lohnen. Hierfür werden Bilanzen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage erstellt.

### 4.1 Energiebilanz und Erntefaktor

Die **Energiebilanz** stellt die über den gesamten Lebenszyklus aufgewendete Energie (sog. "graue Energie" für Herstellung, Transport, Wartung, Rückbau) der während des Betriebs erzeugten Energie gegenüber. Das Ergebnis dieser Bilanz wird durch den **Erntefaktor** (EROEI - Energy Returned on Energy Invested) ausgedrückt:

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

Ein Wert  $> 1$  bedeutet, dass die Anlage energetisch rentabel ist. Für Windkraftanlagen liegt dieser Wert je nach Standort zwischen 20 und 80, was außerordentlich gut ist.

Bei der Interpretation des Erntefaktors muss beachtet werden, ob die gewonnene elektrische Energie mit der aufgewendeten Primärenergie verglichen wird. Um einen fairen Vergleich zu ermöglichen, wird die gewonnene elektrische Energie oft mit einem Faktor (ca. 3) in Primärenergieäquivalente umgerechnet, um die Umwandlungsverluste in konventionellen Kraftwerken zu berücksichtigen.

### 4.2 Energetische Amortisationszeit

Die **energetische Amortisationszeit** (EPBT - Energy Payback Time) ist die Zeit, die eine Anlage benötigt, um die für ihre Herstellung investierte Energie wieder zu erzeugen. Sie steht in direktem Zusammenhang mit dem Erntefaktor:

$$\text{Energetische Amortisationszeit} \approx \frac{\text{Lebensdauer}}{\text{Erntefaktor}}$$

Für eine typische WKA an einem guten Standort beträgt die energetische Amortisationszeit nur etwa 1 Jahr bei einer Lebensdauer von über 20 Jahren (siehe Abbildung 4).

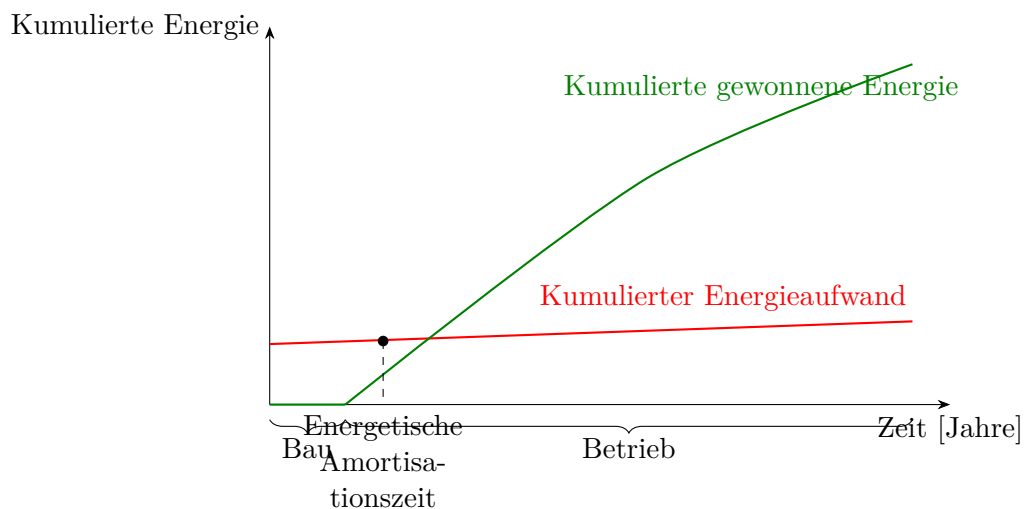


Abbildung 4: Prinzip der energetischen Amortisationszeit (EPBT).

### 4.3 Materialaspekte: Neodym in Generatoren

Ein kritischer Punkt in der Materialbilanz von WKA sind die **Seltenen Erden**, insbesondere **Neodym**, die in den starken Permanentmagneten moderner Generatoren verwendet werden. Diese Magnete ermöglichen den Bau von getriebelosen, direkt-gekoppelten Synchrongeneratoren (Trend bei großen Offshore-Anlagen), die sehr effizient und wartungsarm sind.

**Problematik** Der Abbau von Seltenen Erden findet hauptsächlich in China unter oft problematischen ökologischen und sozialen Bedingungen statt. Hierbei können auch radioaktive Nebenprodukte freigesetzt werden. Dies stellt eine Ironie dar, da eine saubere Energietechnologie auf umweltschädlich gewonnenen Rohstoffen basieren kann.

**Alternativen und Lösungsansätze** Es ist wichtig zu betonen, dass nicht jeder Generator Seltene Erden benötigt. Es existieren verschiedene Generatorkonzepte:

1. **Asynchrongenerator mit Getriebe:** Der traditionelle und am weitesten verbreitete Typ, kommt ohne Permanentmagnete aus.
2. **Doppeltgespeister Asynchrongenerator mit Getriebe:** Der heutige Standard an Land, ebenfalls ohne Permanentmagnete.
3. **Synchrongenerator (getriebelos):** Kann entweder elektrisch erregt (ohne Magnete) oder permanent erregt (mit Neodym-Magneten) sein.
4. **Kompromisslösungen:** Hybride Konzepte mit mittelschnellem Getriebe und kleinerem Synchrongenerator, die den Bedarf an Seltenen Erden reduzieren.

Forschung und Entwicklung zielen darauf ab, die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen weiter zu verringern oder Recyclingprozesse zu etablieren.