



DI Dr. techn. Klaus LEEB

## Windrad 2MW: Der Energieertrag (Windverteilung - cp-Wert)

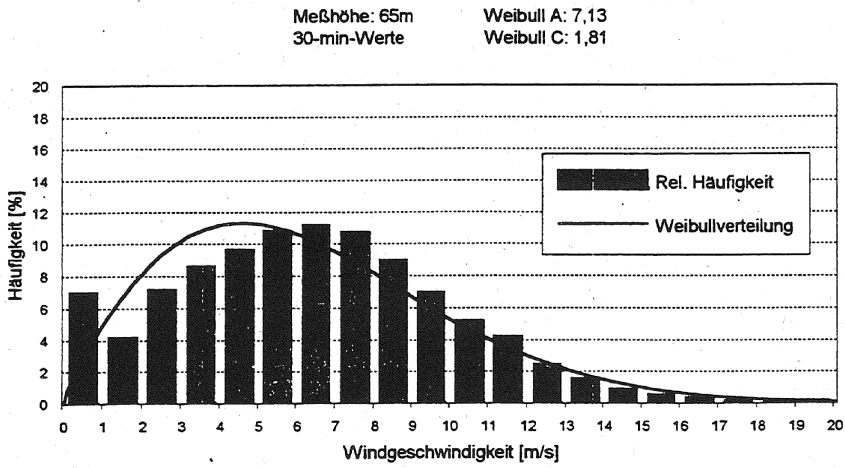


- **Mathematische / Fachliche Inhalte in Stichworten:**  
**Analyse eines Windradstandortes. Standort Lasseo NÖ. Windrad "Vestas V80"  
Interpolation mit kubischen Splines, Häufigkeitsverteilung als angenäherte  
Weibullverteilung.**
- **Kurzzusammenfassung**  
**Aufgrund von Windgeschwindigkeitsmessungen (Darstellung mit Weibull-Verteilung)  
und der Kenndaten des Windrades, das an diesem Standort zum Einsatz kommen  
soll, wird der Ertrag berechnet, mit dem jährlich gerechnet werden kann.**
- **Didaktische Überlegungen / Zeitaufwand:**  
  
**1) Windgeschwindigkeitsverteilung  
2) Ertragsdiagramme  
3) cp-Werte von Windrädern**  
  
**Kennlinie einer Windkraftanlage; Zusammenspiel mit der örtlichen  
Windgeschwindigkeitsverteilung**  
  
**Zeitaufwand: Ein gut vorbereiteter Schüler dürfte für diese Analyse bis zur  
Erstellung der Diagramme ungefähr 3 h (Unterrichtseinheiten) benötigen.**
- **Lehrplanbezug (bzw. Gegenstand / Abteilung / Jahrgang):**  
  
**Fachtheorie: Strömungsmaschinen, Abteilung für Maschineningenieurwesen  
Alternativeenergie**
- **Mathcad-Version:           Mathcad 14**
- **Literaturangaben:**  
  
**Siegfried Heier "Windkraftanlagen", Vieweg-Teubner ISBN: 978-3-8351-01542-5**
- **Anmerkungen bzw. Sonstiges:**  
  
**Fächerübergreifende Betrachtung von Windrädern...**

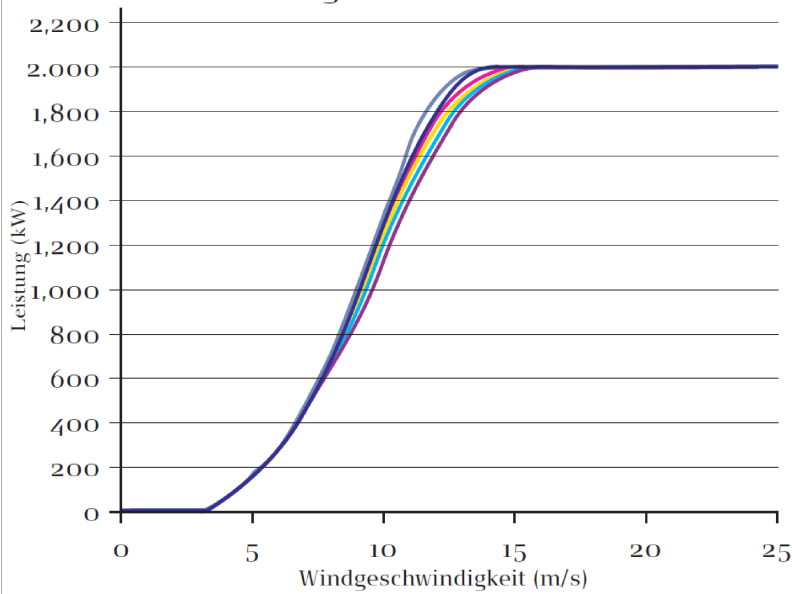


## Der Standort Lassee und seine "Windgeschwindigkeitsverteilung"

### Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in Meßhöhe



### Leistungskurve V80-2.0 MW



Es soll die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Windrades "Vestas V80" am Standort "Lassee" untersucht werden.

Aus der Leistungskurve kann auf den  $c_p$ -Wert (Kennwert analog zum "Wirkungsgrad") der Anlage rückgerechnet werden (siehe Fachliteratur)

## Energieertrag am Standort Lasseo N./Ö. - Einsatz der WKA Vestas V80 2MW

Daten :=  
Lasseo und Vestas V80 2MW.xls

Häufigkeit [%]  
Windgeschw. [m/s] cp-Wert

n := zeilen(Daten) **n = 26**

i := 0..(n - 1)

v\_mess<sub>i</sub> := Daten<sub>i,0</sub> ·  $\frac{m}{s}$

Häufigkeit<sub>i</sub> := Daten<sub>i,1</sub> ·  $\frac{1}{100}$

cp\_Datenblatt<sub>i</sub> := Daten<sub>i,2</sub>

	0	1	2
0	0	6.122	0
1	1	3.878	0
2	2	6.163	0
3	3	8.571	0.01
4	4	9.714	0.295
5	5	11.02	0.39
6	6	11.429	0.434
7	7	10.816	0.449
8	8	8.98	0.47
9	9	6.939	0.46
10	10	5.306	0.438
11	11	4.286	0.391
12	12	2.449	0.345
13	13	1.633	0.288
14	14	0.816	0.238
15	15	0.612	0.198
16	16	0.531	0.163
17	17	0.408	0.136
18	18	0.204	0.115
19	19	0.122	0.098
20	20	0	0.084
21	21	0	0.072
22	22	0	0.063
23	23	0	0.055
24	24	0	0.048
25	25	0	0.043

### Daten der "Vestas V80"

Nabenhöhe h<sub>Nabe</sub> := 67 · m Rotordurchmesser D<sub>Rotor</sub> := 80 · m daher der Name "V80"

Von der Luft durchströmte Rotorfläche  $A_{Rotor} := \frac{D_{Rotor}^2 \cdot \pi}{4}$  **A<sub>Rotor</sub> = 5026.5 m<sup>2</sup>**

v<sub>Anfang</sub> := 0 ·  $\frac{m}{s}$  v<sub>Ende</sub> := 25 ·  $\frac{m}{s}$  Werte := 1000  $\Delta v := \frac{v_{Ende} - v_{Anfang}}{Werte}$

v := v<sub>Anfang</sub>, (v<sub>Anfang</sub> + Δv) .. v<sub>Ende</sub>

## Interpolation für cp-Wert mit kubischen Splines

Damit bei den höheren Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe der zur Geschwindigkeit passende richtige cp-Wert zur Leistungsberechnung genommen wird, werden die Messwerte mit einer kubischen Splinefunktion interpoliert

Spline Koeffizienten  $S := \text{kspline}(v\_mess, cp\_Datenblatt)$

Anpassungsfunktion für x(t)  $cp(v) := \text{interp}(S, v\_mess, cp\_Datenblatt, v)$

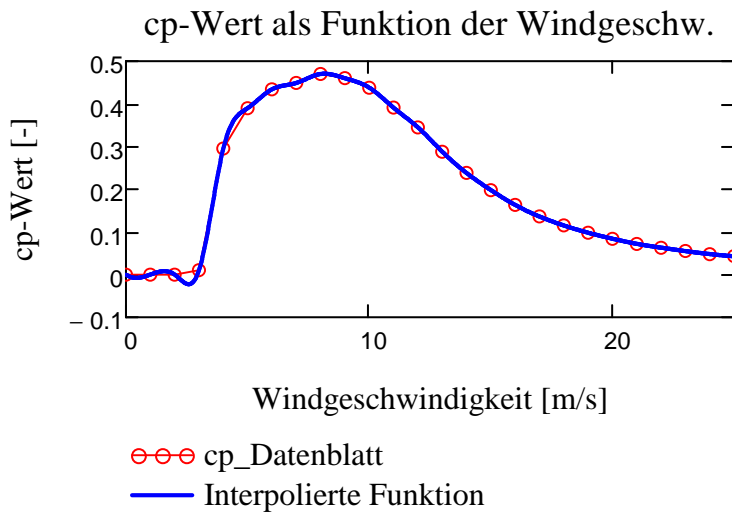


Diagramm dient nur zur Kontrolle !

### 1) Umrechnung der gemessenen Windgeschwindigkeiten auf die Nabenhöhe der WKA

Die Windgeschwindigkeit, die in Messhöhe  $h_{mess}=15m$  ermittelt wurde muss auf die Nabenhöhe  $h_{Nabe}$  umgerechnet werden. Dazu muss die mittlere Rauiglänge der Umgebung (Standort der WKA) berücksichtigt werden.

$z_{rau} := 0.1m$  In Lassee

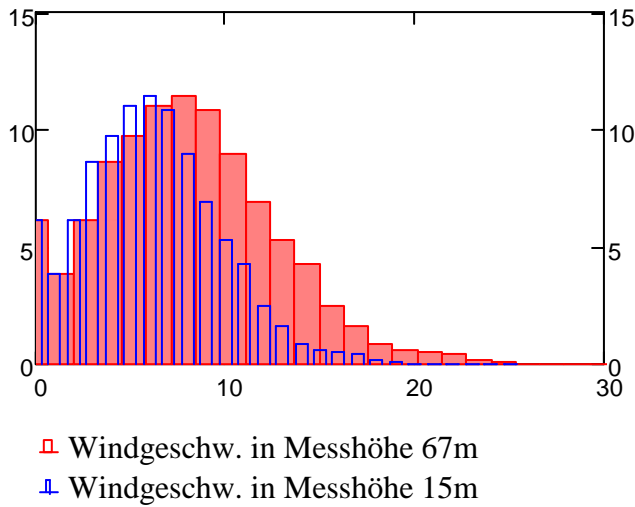
Messhöhe Nabenhöhe Vestas V80

$h_{mess} := 15 \cdot m$

$h_{Nabe} := 67 \cdot m$

$$v_{Nabe,i} := v_{mess,i} \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_{Nabe}}{z_{rau}}\right)}{\ln\left(\frac{h_{mess}}{z_{rau}}\right)}$$

### Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe



Die Windgeschwindigkeit ist in Nabenhöhe wesentlich größer als in Messhöhe wobei die Häufigkeit natürlich gleich bleibt.

--> Der Energieertrag steigt dadurch aber wesentlich an. --> Nabenhöhe ist wegen der höheren Windgeschwindigkeiten eine entscheidende Einflussgröße.

Anm.: Geschwindigkeitsprofil an Erdoberfläche wie Grenzschicht an einer ebenen Platte.

## 2) Leistungskurve der Windkraftanlage "Vestas V80 2MW"

Dichte der Luft  $p_u := 1\text{bar}$   $R_{Luft} := 287 \cdot \frac{J}{\text{kg} \cdot K}$   $T_u := (20 + 273.15) \cdot K$

$$v_u := \frac{R_{Luft} \cdot T_u}{p_u}$$

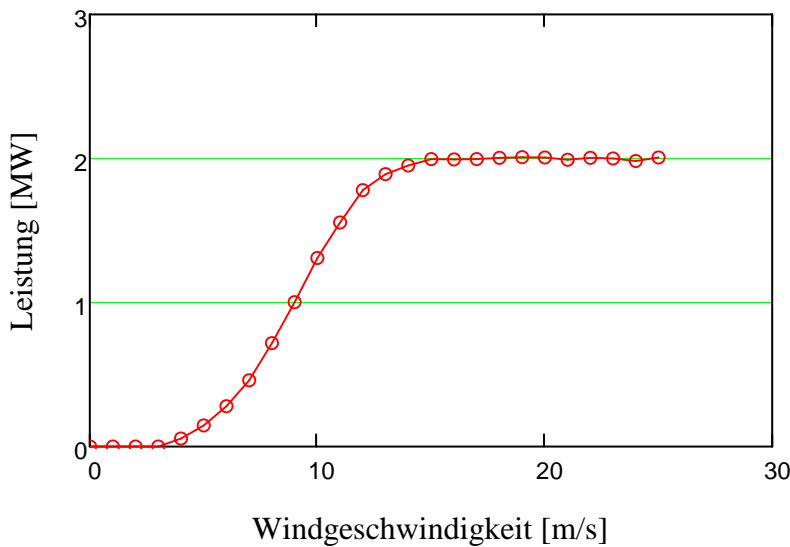
$$\rho_{Luft} := \frac{1}{v_u}$$

$$\rho_{Luft} = 1.189 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{MW} := 10^3 \cdot \text{kW}$$

$$P_{V80_i} := \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot A_{Rotor} \cdot (v_{mess_i})^3 \cdot cp(v_{mess_i})$$

### Leistungskurve Vestas V80



Interpretation: Die Anlage regelt bei 2MW (14m/s) ab --> der Generator kann nicht mehr Energie umsetzen --> es treten Windgeschwindigkeiten über 14m/s eher selten auf --> es zahlt sich nicht aus einen Generator (sehr teuer) einzusetzen, der mehr als 2MW kann.

### 3) Energieertrag der WKA Vestas V80

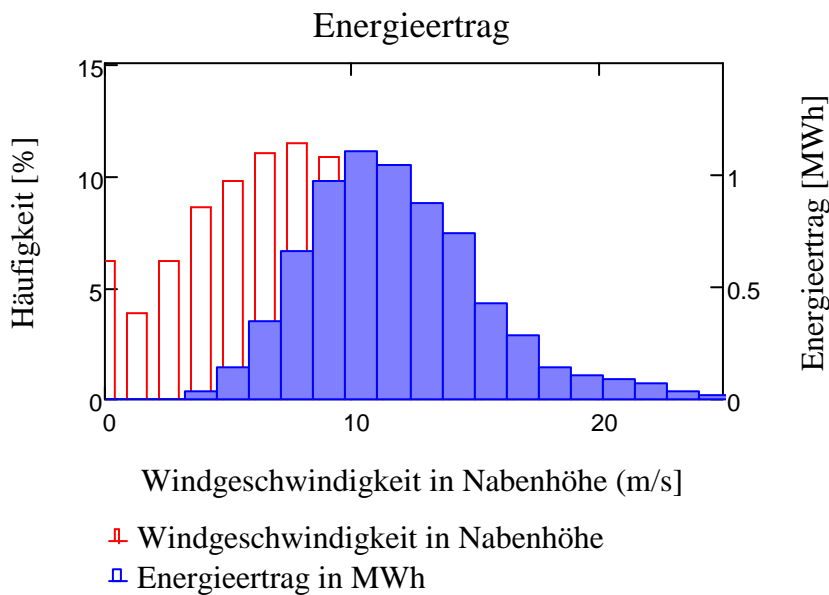
Jahresstunden := 8760 · h

Jahrestunden := 60 · s · 60 · 24 · 365

Jahresstunden = 8760 · h

$$P_{Nabe_i} := \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot A_{Rotor} \cdot (v_{Nabe_i})^3 \cdot cp(v_{Nabe_i})$$

$$Energie_{v80_i} := P_{Nabe_i} \cdot H\u00e4ufigkeit_i \cdot Jahresstunden$$



**Interpretation:** den gr\u00f6\u00dften Ertrag bekommt man nicht bei der am h\u00e4ufigsten vorkommenden Windgeschwindigkeit, sondern aufgrund der Leistungskennlinie der Windkraftanlage.

$$Gesamtenergie := \sum_{i=0}^{n-1} Energie_{v80_i}$$

Gesamtenergie = 7120.2 · MW · h

Gesamtenergie in Messh\u00f6he

Gesamtenergie\_mess := 4392 · MW · h

### Ertrag aus der Energieerzeugung in Euro

Euro := 1

Einspeistarif Steiermark 2005

Preis\_Winter := 0.103 ·  $\frac{\text{Euro}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$

Preis\_Sommer := 0.0563 ·  $\frac{\text{Euro}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$

Annahme: 6 Monate Winter und 6 Monate Sommer:

Ertrag Ertrag\_Winter := Gesamtenergie · Preis\_Winter · 0.5

Ertrag\_Winter = 366689 · Euro

Ertrag\_Sommer := Gesamtenergie · Preis\_Sommer · 0.5

Ertrag\_Sommer = 200433 · Euro

Gesamtertrag

Ertrag\_Sommer + Ertrag\_Winter = 567122 · Euro

Um den Gewinn zu berechnen muss man die Betriebskosten ber\u00fccksichtigen --> Amortisationszeit usw.