



# Boost für Stallanlagen

**Stallgeregelte drehzahlstarre WEA durch eine Zusatzeinrichtung  
im Wirkungsgrad steigern.**

**Dr.- Ing. Dieter Frey  
Ingenieurbüro Frey  
Bürgermeister Kröger Str. 17  
21244 Buchholz-Sprötze  
Tel: 04186 / 55 51 Fax: 50 44  
dieter.frey@ing-buero-frey.de  
www.ing-buero-frey.de**

**Belastungsmessungen an WEA nach IEC 61400-13**

**Leistungskennlinienmessungen an WEA nach IEC 61400-12-1**

**Strukturtests an Rotorblättern nach IEC 61400-23**

**Entwicklung individueller Messsysteme nach Kundenwunsch**

**Lieferung und Einbau von Überwachungssystemen an WEA**

Sektorabschaltung, Schwingungsüberwachung,  
Blattlagerüberwachung, Lagertemperaturüberwachung

**Begutachtungen an WEA**

Weiterbetriebsgutachten, Wiederkehrende Prüfung (im Weiterbetrieb)  
Rotorblattbegutachtung mit Drohne oder mit Seilzugangstechnik  
Begutachtungen gemäß Anforderungen der DGUV an WEA

## **Das „Schaulaufen“:**

Drehen WEA bei schwachem Wind, wird nicht unbedingt Strom erzeugt vor allem dann nicht wenn die Einschaltdrehzahl hoch ist.

## **Der optimale Betriebspunkt:**

Drehzahlstarre WEA haben den optimalen Betriebspunkt bei etwa 8.5 m/s Windgeschwindigkeit. Häufige Standorte in Deutschland haben im Jahresmittel ca. 5 m/s. Daher läuft die WEA selten im optimalen Betriebspunkt.

## **WEA mit nur einer Drehzahl:**

WEA mit nur einer Drehzahl produzieren bei Wind unter 5m/s keinen Strom, beziehen jedoch Strom aus dem Netz und halten so die Drehzahl konstant.

Gelieferter Strom bringt etwa 0,06 EUR/kWh.

Bezogener Strom kostet etwa 0,35 – 0.55 EUR/kWh.

## **WEA mit zwei Drehzahlen:**

WEA mit zwei Drehzahlen sind etwas besser. Schalten jedoch schnell in die große Drehzahlstufe und nur unwillig wieder zurück.

## Grundgedanke:

Gelingt es die WEA vor allem bei niederen Windgeschwindigkeiten drehzahlvariabel zu betreiben, kann der Wirkungsgrad und damit der Ertrag gesteigert werden.

## Eine nicht neue Idee:

Die E17 im Jahre 1991 hatte einen Synchron-Generator und Vollwechselrichter und war somit in einem großen Bereich drehzahlvariabel und wurde im aerodynamischen Optimum betrieben. Dies war damals eine führende Technologie. Dass es noch besser geht, hat Enercon mit den nachfolgenden WEA Typen gezeigt.

In einem Forschungsprojekt wurde vor Jahren eine TW600 bei schwachem Wind drehzahlvariabel betrieben, indem der Asynchron-Generator über einen Wechselrichter mit dem Netz verbunden wurde. Der Wechselrichter hatte keine 600kW Kapazität. Bei stärkerem Wind und höherer Leistung wurde der Generator in herkömmlicher Weise ans Netz angeschlossen.

## Die neue Situation:

Die Kosten für einen Voll- oder Teilwechselrichter sind gegenüber 1990 deutlich gesunken. Der Strompreis, den ältere WEA erhalten, ist heute bei geringen Windgeschwindigkeiten recht hoch und bei viel Wind gering bis negativ.

WEA, die nur bei starkem Wind Strom erzeugen, der dann vielleicht nicht einmal gebraucht wird, sind nicht mehr der „Renner“.

„Bei wenig Wind bitte viel Ertrag“ ist gewünscht.

## **Altanlagen, die nicht ersetzt werden können:**

Altanlagen, die nicht ersetzt werden können, haben durchaus über die 20 Jahre hinaus eine noch nennenswerte Lebensdauer.

## **Altanlagen, die abgebaut werden:**

Altanlagen, die abgebaut und im Ausland wieder errichtet werden, werden dort für lange Zeit weiter betrieben.

Der Wunsch: „Bei wenig Wind bitte viel Ertrag“ gilt auch dort und steigert den wirtschaftlichen Erfolg. In diesem Fall kann die Umrüstung vor der Wiederinbetriebnahme erfolgen.

## **Der Vorschlag:**

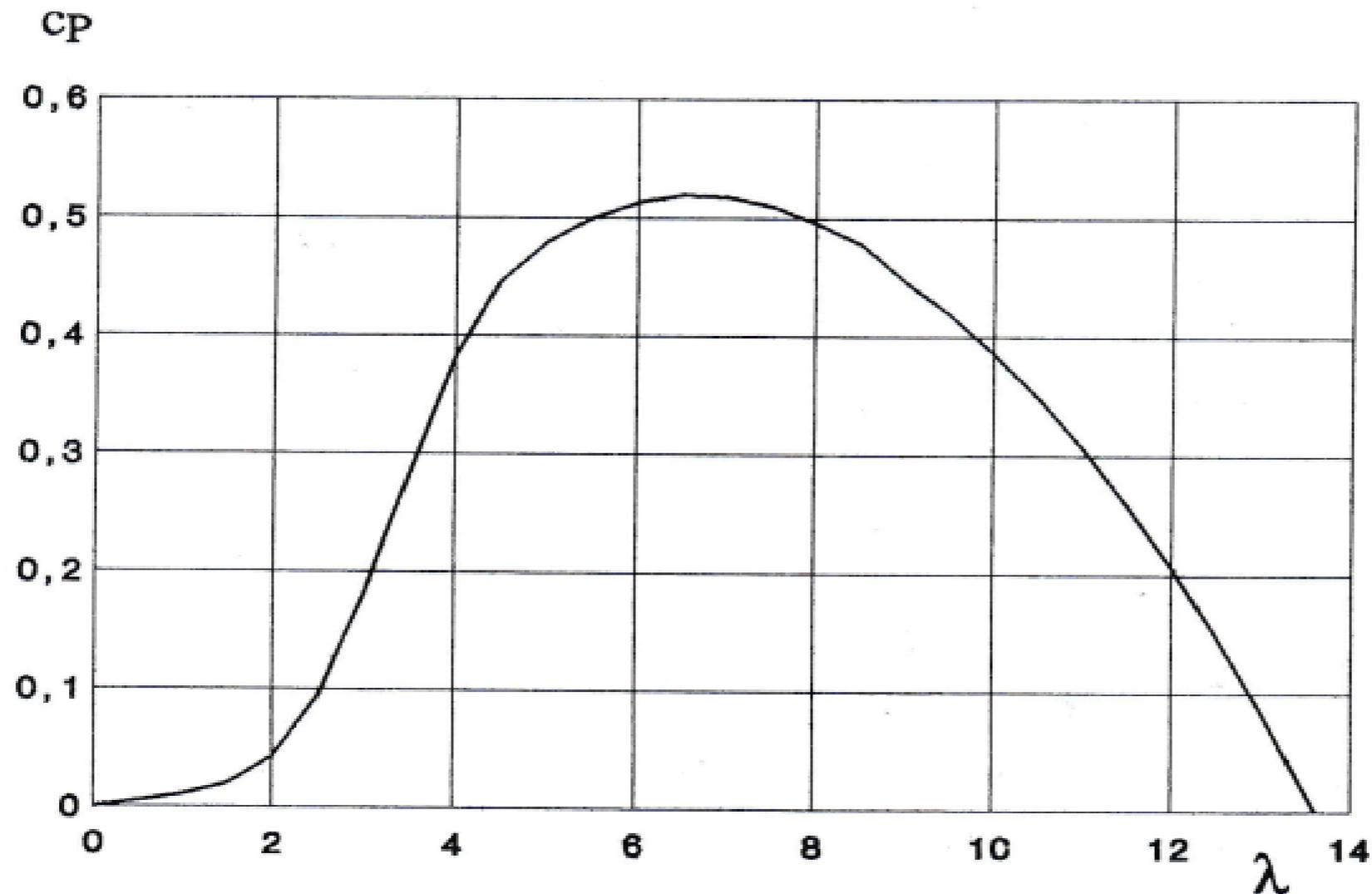
Drei mögliche Lösungen:

- > Die WEA erhält einen Synchron-Generator und einen Vollwechselrichter.
- > Der Asynchron-Generator erhält einen Teil- oder Vollwechselrichter.
- > In den Triebstrang wird ein Synchron-Generator und Vollwechselrichter mit 1/3 Nennleistung eingebaut.

Die Vorschläge lassen sich umsetzen, ohne dass die ursprüngliche Steuerung der WEA getauscht werden muss.

## Vorgehensweise in diesem Vortrag:

Aus dem Lehrbuch „Windkraftanlagen von R. Gasch“ wird die „cp-lambda“ Kennlinie für eine Schnelllaufzahl von 7 verwendet und für eine NTK 600 ( 600 kW bei 26,8 1/min und 180kW bei 17,9 1/min ) der Vorteil des drehzahlvariablen Betriebes aufgezeigt.



*Bild 6.2: Leistungsbeiwert  $c_p$  eines Schnellläufers als Funktion der Schnellaufzahl  $\lambda$ , Auslegungsschnellaufzahl  $\lambda_A = 7$*

## Ergebnis der Berechnung:

Zeilen 1.0 .. 15.0 m/s = Windgeschwindigkeit    Spalten 3.91 .. 26.80 1/min = Drehzahl

Drehzahl,	3.91,	5.18,	6.46,	7.73,	9.00,	10.27,	11.54,	12.81,	14.08,	15.36
1.0,	0.37,	0.19,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00
2.0,	2.76,	3.36,	3.33,	2.98,	2.46,	1.63,	0.33,	0.00,	0.00,	0.00
3.0,	4.23,	7.97,	10.33,	11.30,	11.45,	10.91,	10.10,	9.01,	7.51,	5.58
4.0,	3.94,	9.88,	16.48,	21.80,	25.45,	26.75,	27.14,	26.76,	25.47,	23.98
5.0,	3.65,	9.84,	19.11,	29.38,	39.43,	45.50,	50.18,	52.20,	53.02,	53.02
6.0,	4.66,	7.33,	19.46,	32.82,	47.52,	62.57,	73.25,	81.99,	87.25,	90.16
7.0,	5.53,	9.17,	15.52,	33.70,	51.88,	71.78,	92.27,	110.21,	122.11,	134.01
8.0,	6.17,	10.92,	15.67,	29.69,	53.44,	77.18,	103.02,	129.79,	156.56,	173.23
9.0,	6.73,	12.48,	18.49,	24.50,	49.50,	79.55,	109.60,	142.12,	176.00,	209.88
10.0,	8.30,	13.76,	21.18,	28.60,	38.72,	75.82,	112.93,	150.03,	189.95,	231.77
11.0,	10.05,	14.65,	23.63,	32.61,	41.59,	64.66,	109.55,	154.45,	199.34,	247.37
12.0,	11.96,	15.84,	25.75,	36.43,	47.12,	57.80,	98.14,	151.57,	204.99,	258.42
13.0,	14.03,	18.59,	27.43,	39.97,	52.51,	65.05,	77.59,	140.05,	202.75,	265.45
14.0,	16.27,	21.56,	28.58,	43.13,	57.67,	72.21,	86.76,	118.55,	191.27,	263.99
15.0,	18.68,	24.75,	30.82,	45.79,	62.49,	79.19,	95.88,	112.58,	169.20,	252.68

Drehzahl,	16.63,	17.90,	19.17,	20.44,	21.71,	22.99,	24.26,	25.53,	26.80
1.0,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00
2.0,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00
3.0,	2.87,	0.61,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00,	0.00
4.0,	22.14,	19.89,	16.87,	13.31,	8.90,	3.07,	0.00,	0.00,	0.00
5.0,	51.29,	49.24,	46.87,	44.15,	40.78,	36.58,	31.86,	26.11,	19.83
6.0,	91.61,	91.61,	90.43,	87.52,	84.45,	81.05,	77.34,	72.48,	67.40
7.0,	139.16,	143.12,	145.48,	145.48,	145.48,	141.67,	137.70,	133.39,	128.77
8.0,	188.77,	203.23,	208.41,	213.59,	217.16,	217.16,	217.16,	214.49,	209.31
9.0,	236.62,	256.29,	275.96,	290.93,	297.49,	304.05,	309.20,	309.20,	309.20
10.0,	273.60,	313.58,	337.87,	362.15,	386.44,	400.82,	408.91,	417.01,	424.14
11.0,	297.98,	348.59,	399.19,	434.78,	464.17,	493.55,	522.93,	535.37,	545.16
12.0,	315.26,	375.49,	435.71,	495.94,	548.32,	583.29,	618.26,	653.23,	685.44
13.0,	328.15,	394.48,	465.16,	535.84,	606.52,	677.20,	720.82,	761.86,	802.90
14.0,	336.71,	409.43,	485.90,	567.88,	649.85,	731.82,	813.80,	878.04,	925.63
15.0,	336.16,	419.64,	503.11,	590.40,	684.50,	778.60,	872.70,	966.81,	1056.23

## Möglicher Mehrertrag:

### Erläuterung zu der Tabelle:

Es ist nicht das Ansinnen, die Tabelle während des Vortrages zu durchdringen, vielmehr kann dies zu einem späteren Zeitpunkt in aller Ruhe geschehen.

Zur besseren Darstellung ist die Tabelle in der Präsentation vertikal geschnitten.

- > Die Tabellenwerte sind Leistungen in kW.
- > Die x-Achse ist die Drehzahl. Die Schrittweite ist so gewählt, dass sich die beiden Drehzahlen 17.9 1/min und 26.8 1/min ergeben ( kleine und große Generatorstufe ).
- > Die y-Achse ist die Windgeschwindigkeit.

Die optimalen Betriebspunkte lassen sich leicht erkennen und daraus drei Leistungskennlinien ableiten.

- > 1. Kennlinie = optimaler Betrieb
- > 2. Kennlinie = originaler Betrieb zwei Drehzahlen
- > 3. Kennlinie = originaler Betrieb nur eine Drehzahl ( große Stufe )

Bei der 3. Kennlinie ist die Leistung auch bei 5 m/s zu Null gesetzt, da Beobachtungen vor Ort zeigen, dass die untersuchte WEA in der großen Drehzahlstufe bei 5 m/s keine Leistung erzeugt. Darunter beginnt das „Schaulaufen“.

An einer realen vergleichbaren WEA wurde die Startwindgeschwindigkeit aus diesem Grund auf 5 m/s gesetzt.

## Die Leistungskennlinien und Erträge:

### Leistungskennlinien:

Wind	optimal Leistung	2 Drehzahlen Leistung	1 Drehzahl Leistung
1.0,	0.00,	0.00,	0.00
2.0,	0.00,	0.00,	0.00
3.0,	11.45,	0.00,	0.00
4.0,	27.14,	0.00,	0.00
5.0,	53.02,	49.24,	0.00
6.0,	91.61,	67.40,	67.40
7.0,	143.12,	128.77,	128.77
8.0,	209.31,	209.31,	209.31
9.0,	309.20,	309.20,	309.20
10.0,	424.14,	424.14,	424.14
11.0,	545.16,	545.16,	545.16
12.0,	600.00,	600.00,	600.00
13.0,	600.00,	600.00,	600.00
14.0,	600.00,	600.00,	600.00
15.0,	600.00,	600.00,	600.00

### Gerechneter Jahresenergieertrag bei Normbedingungen ( Rayleigh-Verteilung )

Jahres-Wind	Ertrag MWh	Ertrag MWh	Ertrag MWh
m/s			
4	456	362	301
5	842	751	690
6	1277	1195	1141
7	1654	1584	1538
8	1914	1854	1815
9	2050	1999	1966
10	2087	2043	2016
11	2054	2017	1993

### Erläuterung:

dargestellt sind drei Leistungskennlinien

> optimale Kennlinie

> Kennlinie mit 2 Drehzahlen ( 17,9 / 26,8 1/min )

> Kennlinie mit 1 Drehzahl ( 26.8 1/min )

Unter den Kennlinien sind die normierten Jahreserträge in MWh angegeben.

Bei einer Jahreswindgeschwindigkeit von 5 m/s ergibt sich durch Optimierung gegenüber einer:

> WEA mit zwei Drehzahlen 12% Steigerung.

> WEA mit einer Drehzahl 22% Steigerung.

Die von uns schon vor langer Zeit vorgestellte optimale Windnachführung lässt nochmals 5% erwarten.

Die Mehrerträge entstehen zumeist, wenn der Strom gut bezahlt wird ( Day Ahead ).

- > Bei einem nennenswerten Weiterbetriebszeitraum kann es sinnvoll sein, die Betriebsweise der WEA in der vorgeschlagenen Weise zu verbessern.
- > Jeder Mehrertrag einer WEA ist von Vorteil, da der Eingriff in die Umwelt nicht größer wird, jedoch der Nutzen steigt.
- > Eine langsamer laufende WEA ist in der Regel leiser.
- > Den Vorschlag kann ich nicht alleine umsetzen und suche daher Partner.
- > Die für den Versuch notwendige WEA kann ich an einem Standort mit etwa 5 m/s stellen.
- > Die 600 kW WEA hat noch einige Jahre Weiterbetrieb und zwei Drehzahlstufen.
- > Was die Eingriffe in die Steuerung und die Nachweisführung angeht ist ausreichend Wissen vorhanden.

Sprötze, den 9.11.2023  
Dr.- Ing. Dieter Frey