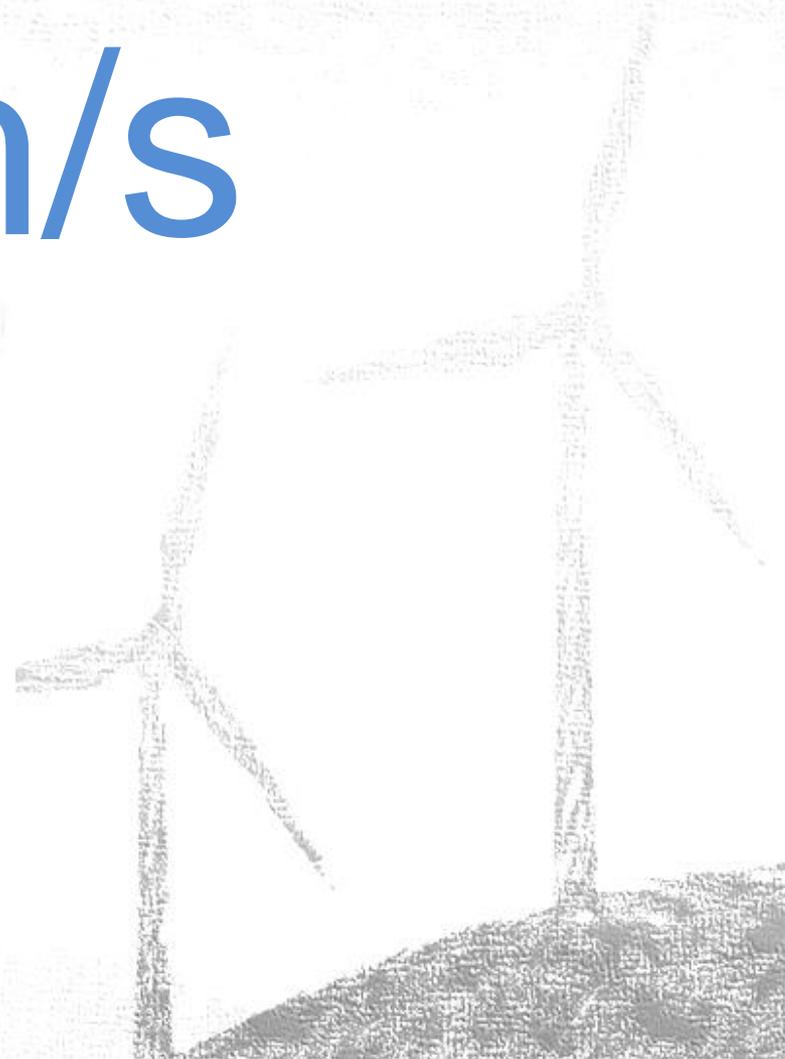


Das kleine Windrad - 1x1



Was bedeutet „Windhöffigkeit“

von **7 m/s**



Dazu brauchen wir ein bisschen Physik 😊

**Die Leistung eines Windrades
errechnet sich aus:**

Windleistung x Leistungsbeiwert

P_W in Watt

C_p

Die Windleistung errechnet sich aus:

$$P_W = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

P_W = Leistung des Winds [Watt]

ρ = Luftdichte: [1,225 kg/m³]

A = vom Wind durchströmte Fläche (Rotorfläche) [m²]

v = Windgeschwindigkeit [m/s]

abgeleitet aus: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$ $m = \rho \times A \times v$

m ist quasi die Masse des durch das Windrad fliegenden „Luftpakets“

Wichtig dabei:

$$P_W = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Die Windgeschwindigkeit geht in der 3. Potenz in die Leistung des Windes und damit auch des Windrades ein!

Das heißt:

Doppelte Windgeschwindigkeit = 8-fache Energieleistung

Der Leistungsbeiwert nach Betz [c_p]

Das **Betz'sche Gesetz** besagt, dass eine Windkraftanlage
max. 16/27 (60 %)
der Windleistung in Nutzleistung umwandeln kann.

Moderne Rotoren erreichen Leistungsbeiwerte von
 $c_p = 0,4$ bis $0,5$
das sind etwa 70 bis 85 % des theoretisch Möglichen.

Der **Betz'sche Leistungsbeiwert** beschreibt somit den
Gütefaktor einer Windkraftanlage.

Berechnen wir ein Beispiel bei einem Rotordurchmesser von 160 m und einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s:

Enercon E- 160

RotorØ	160 m	Dichte der Luft	1,100 kg/m ³	(bei 1300 m / 6 °C)
Rotorfläche	20105,6 m ²	cP WR	0,469	
Windgeschwindigkeit	<input type="text" value="7"/> m/s			

$$P_{\text{Wind}} = 1/2 \times \frac{1,100 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 20106 \text{ m}^2 \times \frac{7,0^3 \text{ m}^3}{\text{s}^3}$$

$$P_{\text{Wind}} = 3.792.921 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} = 3.793 \text{ kW}$$

$$P_{\text{WR}} = 3.793 \text{ kW} \times 0,469 = 1779 \text{ kW}$$

P = Leistung des Winds [Watt]

ρ = Luftdichte = 1,100 kg/m³ (bei 1300 m / 6 °C)

A = Rotorfläche = 20106 m²

v = Windgeschwindigkeit = 7 m/s

c_p bei 7m/s

Berechnen wir ein Beispiel bei einem Rotordurchmesser von 160 m und einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s:

Enercon E- 160

RotorØ	160 m	Dichte der Luft	1,100 kg/m ³	(bei 1300 m / 6 °C)
Rotorfläche	20105,6 m ²	cP WR	0,421	
Windgeschwindigkeit	<input type="text" value="5"/> m/s			

$$P_{\text{Wind}} = 1/2 \times \frac{1,100 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 20106 \text{ m}^2 \times 5,0^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3}$$

$$P_{\text{Wind}} = 1.382.260 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} = 1.382 \text{ kW}$$

$$P_{\text{WR}} = 1.382 \text{ kW} \times 0,421 = 582 \text{ kW}$$

P = Leistung des Winds [Watt]

ρ = Luftdichte = 1,100 kg/m³ (bei 1300 m / 6 °C)

A = Rotorfläche = 20106 m²

v = Windgeschwindigkeit = 5 m/s

c_p bei 5m/s

Ergebnis:

**Wenn sich ein Windrad bei konstant
7 m/s Windgeschwindigkeit
1 Stunde lang dreht, werden
1779 kWh Strom erzeugt.**

D.h. in ca. 2 Stunden wäre der Jahresstrombedarf
einer 4-köpfigen Familie erzeugt.

Man beachte:

Bei 5 m/s Windgeschwindigkeit sind es noch
582 kWh.

Wie ist nun die angenommene jährliche Durchschnitts-Windgeschwindigkeit von 7 m/s einzuordnen?

Nun, der Energie-Ertrag hängt nicht allein von der jährlichen Durchschnitts-Windgeschwindigkeit, sondern viel mehr von der **Windgeschwindigkeits-Verteilung** ab.

Auf Grund dieser Abhängigkeit ist die

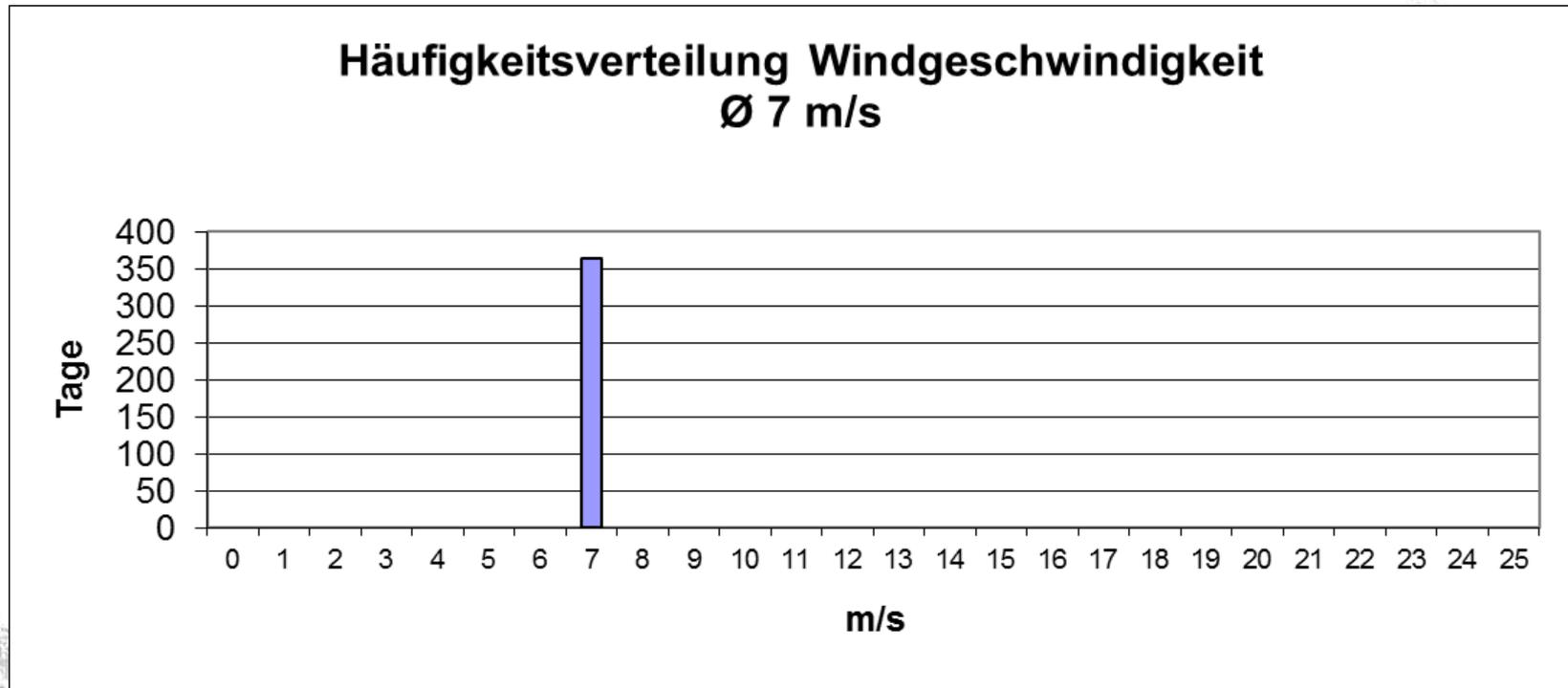
Windgeschwindigkeits-Verteilung

für die Ertragsbestimmung wichtig und ergibt oft vorteilhaftere Werte als die bloße Bestimmung der jahresdurchschnittlichen Windgeschwindigkeit.

Sehen wir uns verschiedene Szenarien an,
welchen jeweils eine durchschnittliche
Jahres-Windgeschwindigkeit von
7 m/s zugrunde liegt.

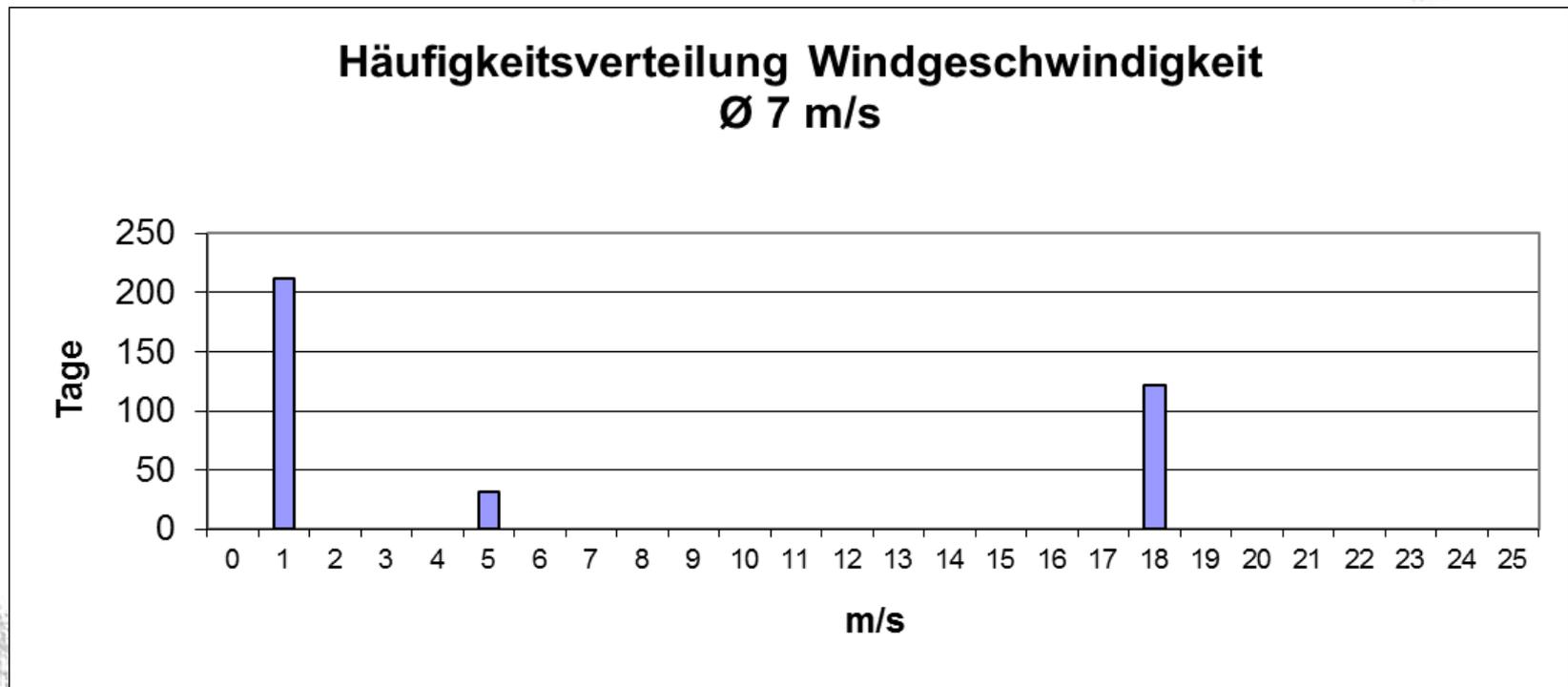
(Berechnet auf Basis einer 3 MW-Anlage)

Hier nehmen wir an, der Wind bliese konstant an 365 Tagen mit 7 m/s, das heißt, es herrscht eine Durchschnitts-Windgeschwindigkeit von **7 m/s**.
Der Stromertrag wäre **4,66** Mio. kWh



Hier nehmen wir an, der Wind bliese an 212 Tagen mit 1, an 31 Tagen mit 5 und an 122 Tagen mit 18 m/s. Auch hier herrscht eine Durchschnitts-Windgeschwindigkeit von **7 m/s**.

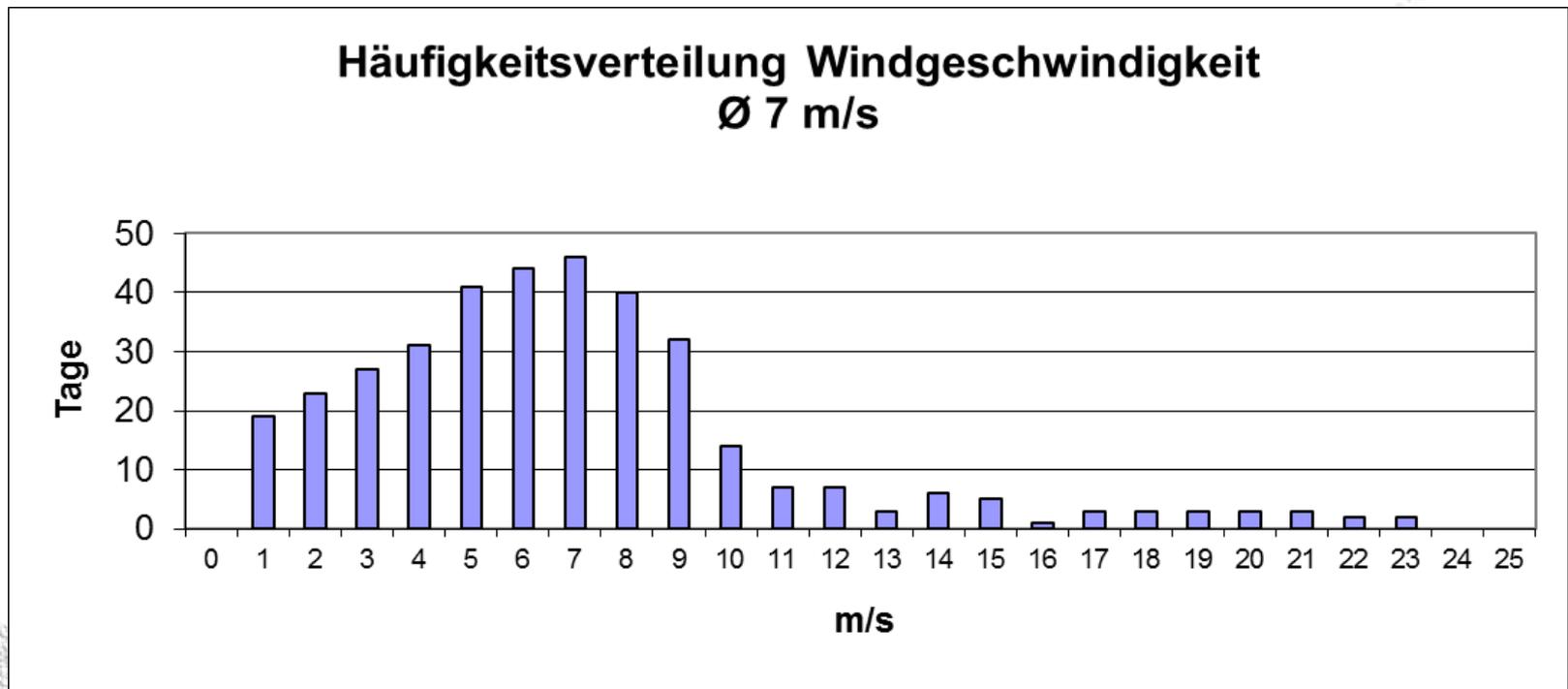
Der Stromertrag wäre **8,96** Mio. kWh



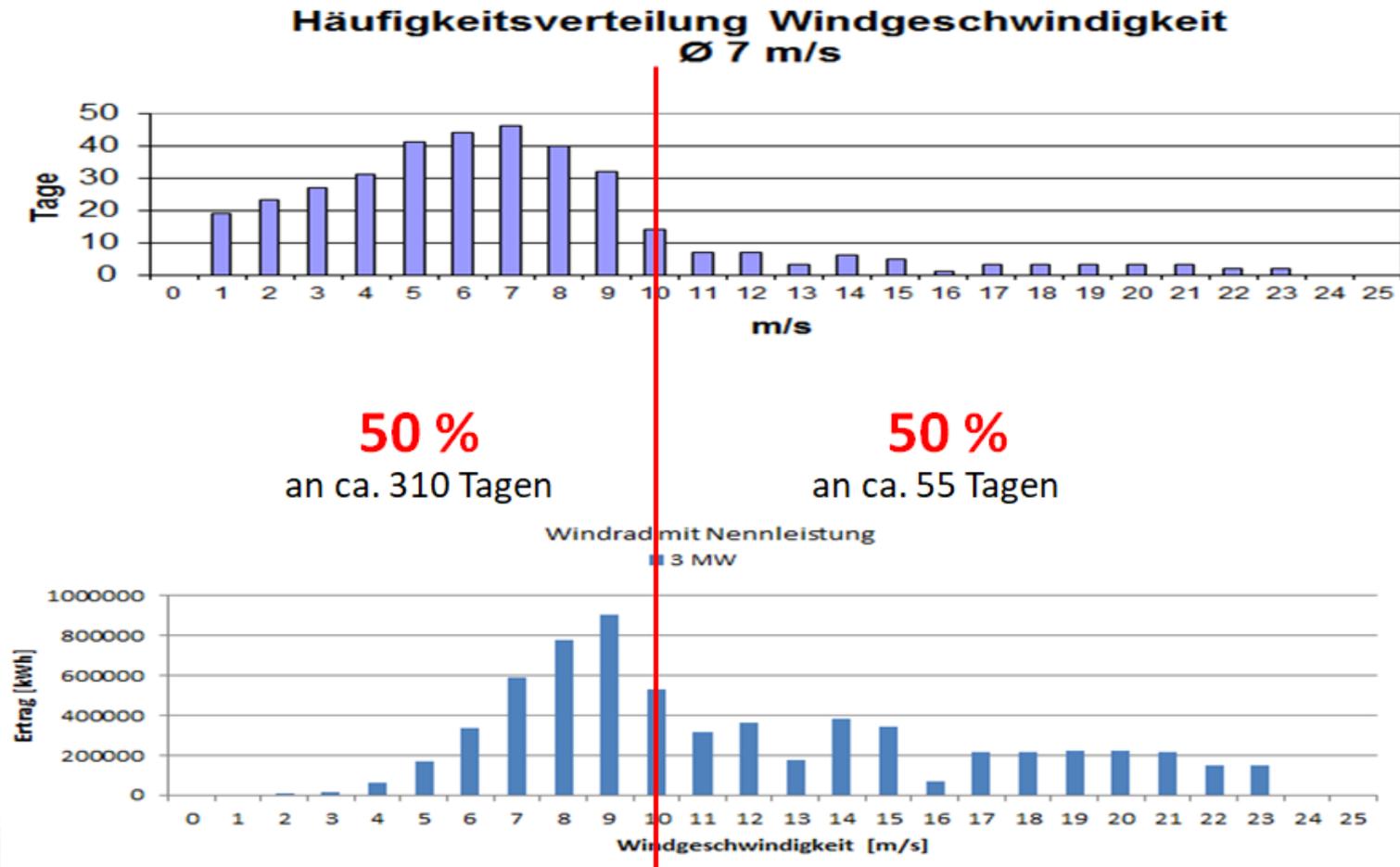
Hier sehen wir eine typische, der Realität nahekommende, Windgeschwindigkeitsverteilung. Auch diese ergibt eine Durchschnitts-Windgeschwindigkeit von **7 m/s**.

Der Stromertrag hier wäre **6,45** Mio. kWh

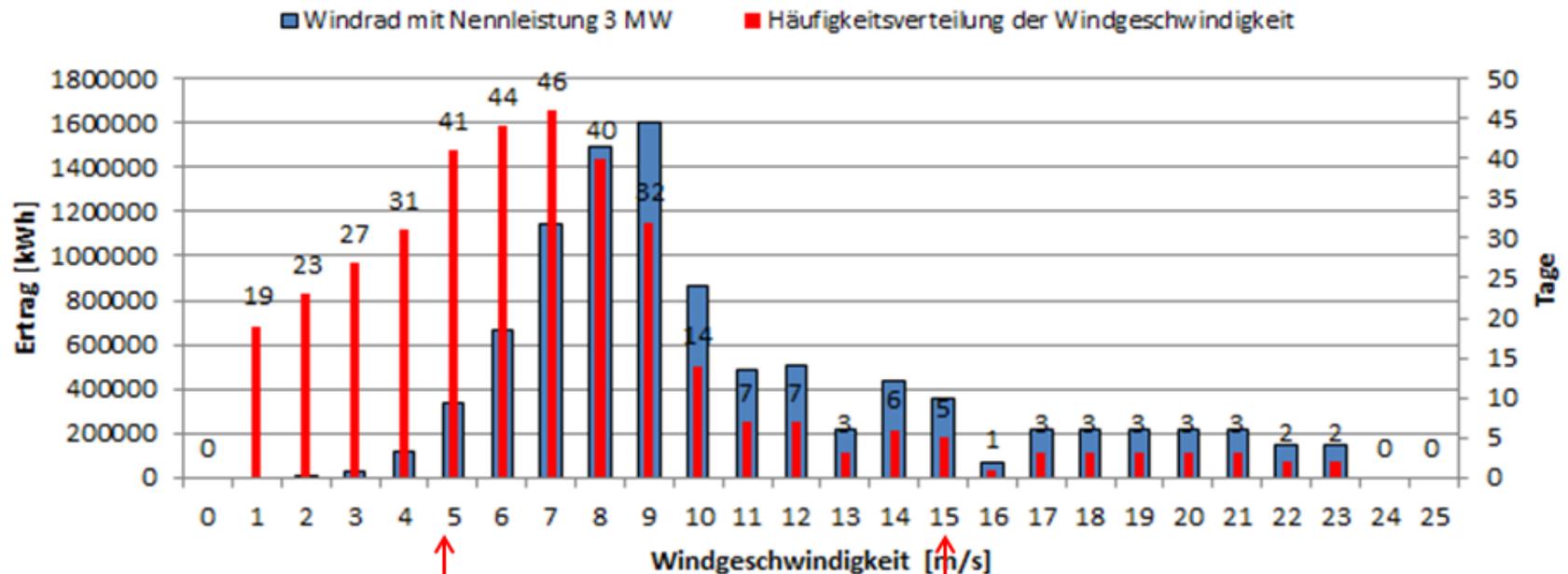
Diese Häufigkeitsverteilung wird auch Weibull-Verteilung genannt.



Wenn man einer solchen Verteilung die entsprechenden Stromerträge gegenüberstellt, sieht man, dass 50% des Jahresertrages bereits an 55 Tagen erreicht sind.



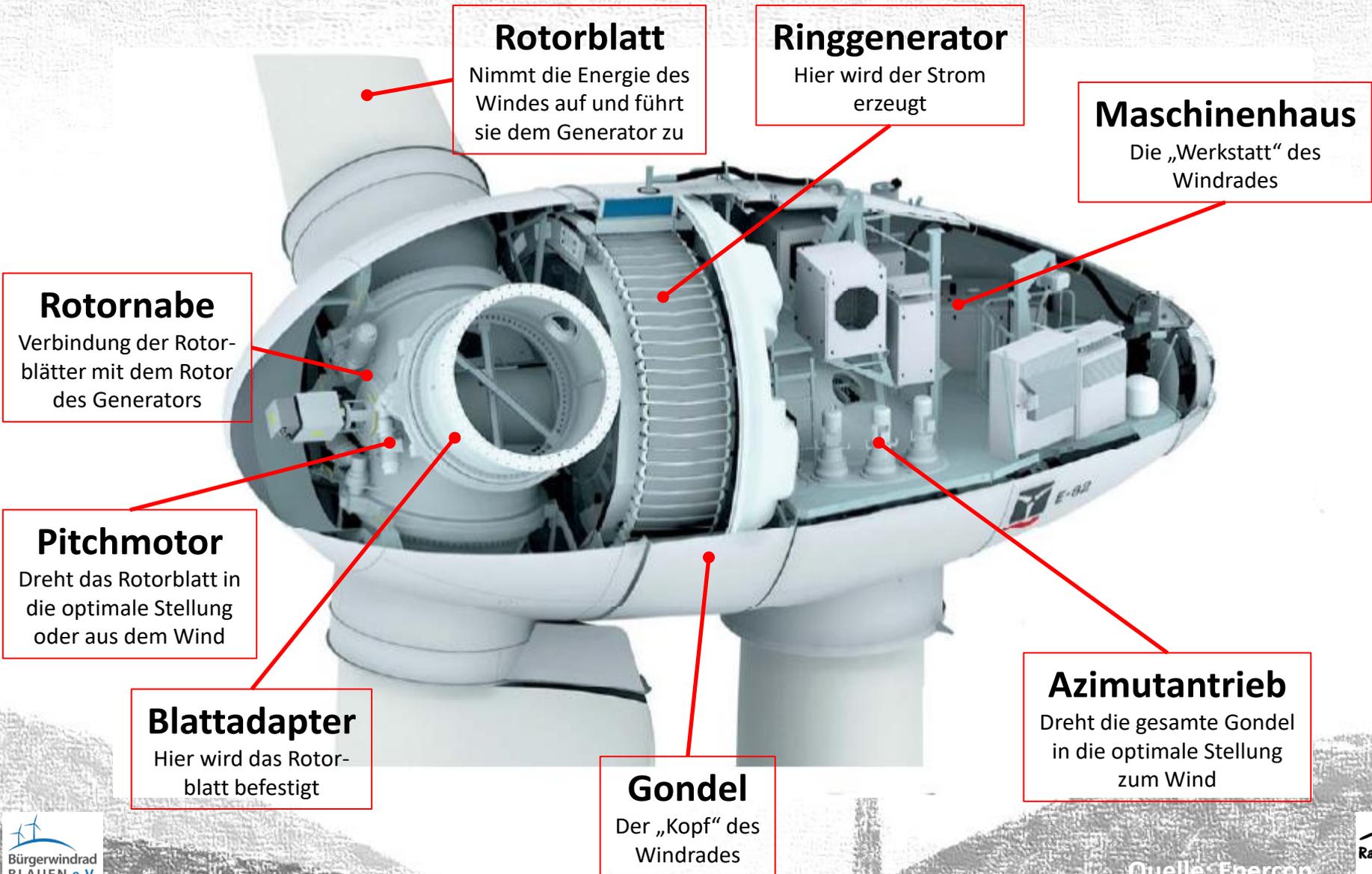
In dieser Darstellung des selben Szenarios sieht man u.a., dass an 41 Tagen mit 5 m/s und an 5 Tagen mit 15 m/s jeweils der gleiche Ertrag mit 350.000 kWh erzielt wird.



41 Tage mit 5 m/s
 ≈ 350.000 kWh

5 Tage mit 15 m/s
 ≈ 350.000 kWh

Typischer Aufbau einer Windrad-Gondel am Beispiel einer Enercon-Anlage



Volllaststunden

Die Volllaststunden (VLh) sind ein Maß für die Ausnutzung eines Kraftwerkes.

Die VLh sind aber *nicht* nur die Stunden, in denen eine Anlage mit Volllast arbeitet. Auch Zeiten mit Teillastbetrieb tragen zur Energieproduktion bei und somit zu den VLh.

Der Wert der VLh ergibt sich, indem man die jährlich erzeugte Energiemenge durch die maximale Leistung der Anlage dividiert.

Am Beispiel eines Windrades mit einer max. Leistung von 3 MW = 3000 kW und dem angenommenen Ertrag (Energiemenge) von 6,45 Mio. kWh würde das so aussehen:

$$6.450.000 \text{ kWh} : 3.000 \text{ kW} = 2150 \text{ h (VLh)}$$

Da ein Jahr 8760 Stunden hat, wird von Laien oft bemängelt, dass eine Volllaststundenzahl von (in unserem Beispiel) 2150 h oder 25% nicht wirtschaftlich sein kann.

Nun, 100% Volllaststunden, auf ein Auto übertragen, würde heißen, man führe das Auto 24 Stunden und 7 Tage die Woche mit Vollgas und Höchstgeschwindigkeit durch die Gegend.

Das ist bei einem Auto genauso unrealistisch wie bei einem Windrad.

Bei konventionellen Gas- oder Kohlekraftwerken jedoch sieht es so aus, dass diese, bei ständiger Brennstoffzufuhr, auf Volllaststunden von 8000 oder 90% Auslastung kommen können.

Da Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen naturgemäß nicht ständig „befeuert“ werden, ist ein diesbezüglicher Vergleich aus naheliegenden Gründen nicht zulässig.

Der entscheidende Unterschied ist aber:

Der „Brennstoff“ ist erneuerbar, erzeugt kein CO₂ und ist kostenlos.

Nun wäre es sehr einfach, die VLh eines Windrades deutlich zu erhöhen, indem man einen kleinen Generator mit einem großen Rotor kombiniert. Dadurch würde schon bei einem lauen Lüftchen der Generator unter Vollast laufen.

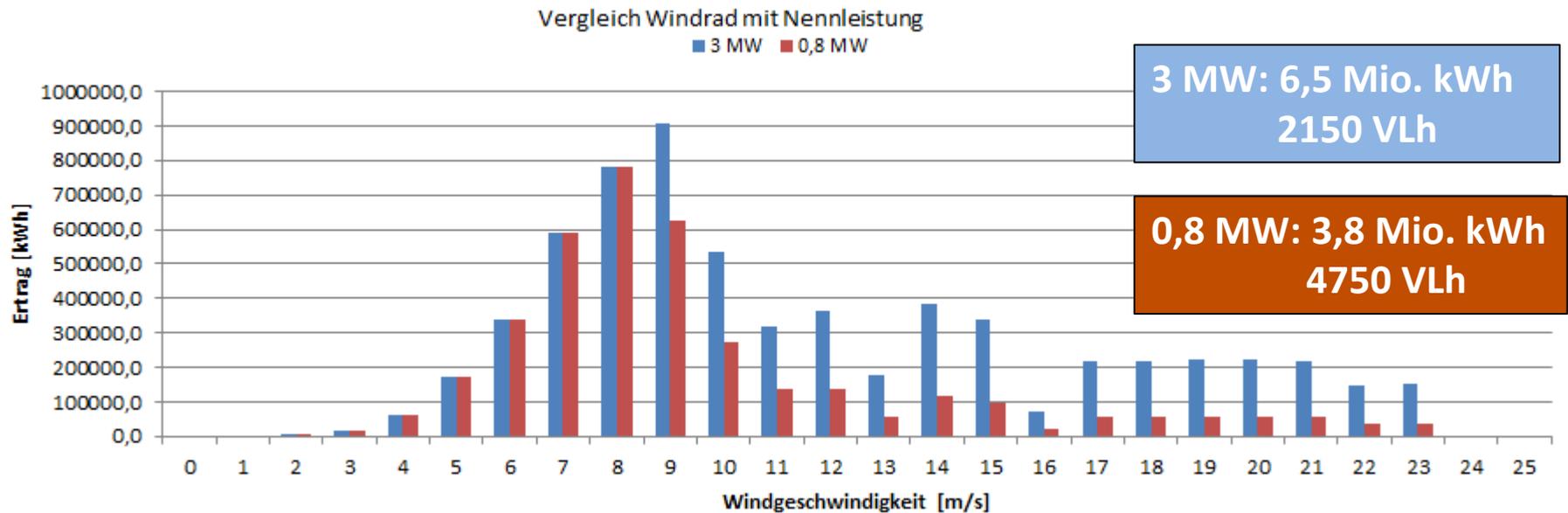
Allerdings würde man dadurch die hohen Erträge bei höheren Windgeschwindigkeiten „verschenken“.

Man erinnere sich:

Doppelte Windgeschwindigkeit = 8-fache Energieleistung

Das heißt, das Windrad bringt die vom Rotor eingefangenen „PS“ nicht auf den Boden.

An unserem Beispiel mit der 3 MW-Anlage, verglichen mit einer 0,8 MW-Anlage, würde das wie folgt aussehen:



Mit einem Windrad der 0,8 anstelle der 3 MW-Klasse würde man näherungsweise (bei gleichem Rotor) zwar auf gut die doppelten Volllaststunden kommen, da es wesentlich länger unter hoher Auslastung laufen würde. Man würde aber 2,7 Mio. kWh verschenken.

Das 3 MW-Windrad ist jedoch, auch bei einer weit geringeren Volllastzahl, in der Lage, auch die hohen Windgeschwindigkeiten auszunutzen und kommt dadurch auf einen gut 70% höheren Ertrag.

Daraus folgt: Je größer der Generator, desto kleiner die VLh.

Die große Kunst besteht nun darin, die optimale Auslegung zu finden. Einerseits aus Sicht des Windrad-Betreibers, der eine möglichst hohe Stromproduktion seiner Anlage anstrebt.

Andererseits muss auch der Gesamt-Zusammenhang betrachtet werden.

Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten z.B. kann die große Strommenge nicht mehr abtransportiert werden bzw. das Netz müsste unter hohen Kosten über den eigentlichen Bedarf hinweg ausgebaut werden.

Oder das Windrad muss entsprechend heruntergeregelt werden.

Das Ziel heißt also: Ermittlung des richtigen Verhältnisses zwischen maximalem Ertrag und maximaler Auslastung.

Das reine Betrachten der Volllaststunden ist somit obsolet.

Geräusche

Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)

Vom 26. August 1998 (GMBL Nr. 26/1998 S. 503)

Geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5)

6. Immissionsrichtwerte

6.1 Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden

Die Immissionsrichtwerte für den Beurteilungspegel betragen für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden

	tags	nachts
d) in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	60 dB(A)	45 dB(A)
e) in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	55 dB(A)	40 dB(A)
f) in reinen Wohngebieten	50 dB(A)	35 dB(A)
g) in Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	45 dB(A)	35 dB(A)

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte am Tage um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten.

105 dB(A)
bei Volllast an den
Flügelspitzen gemessen

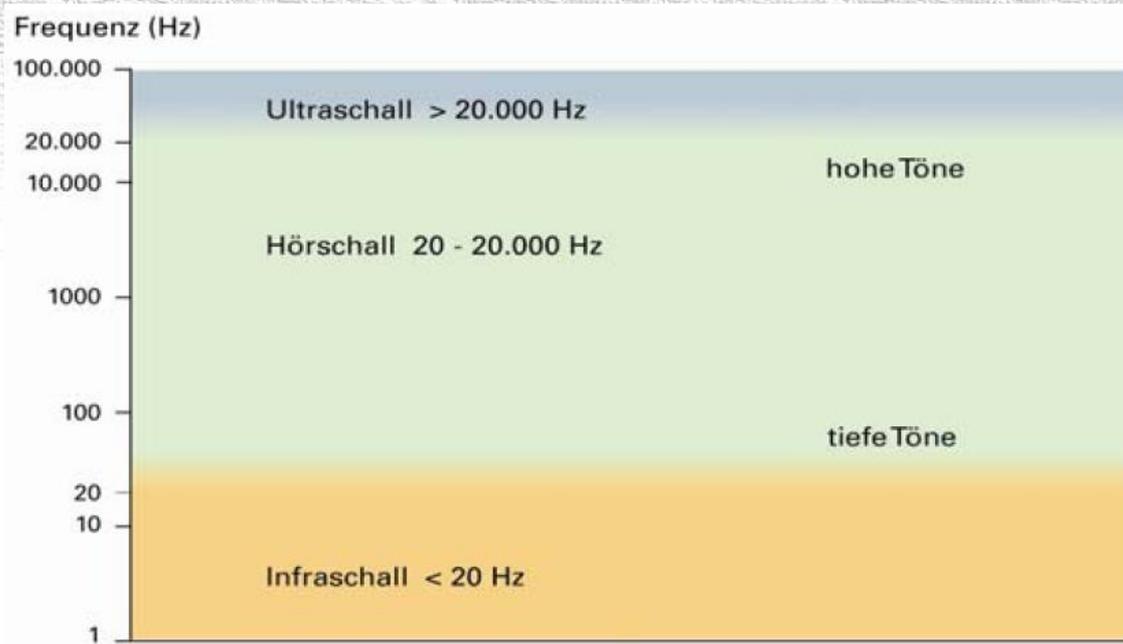
400 m

45 dB(A)
(ruhige Straße)

900 m

35 dB(A)
kaum mehr
wahrnehmbar
(Flüstern)

Infraschall



Bei Infraschall handelt es sich um Töne, die so tief sind, dass Menschen sie normalerweise nicht wahrnehmen. Nur wenn die Lautstärke sehr hoch ist, können wir Infraschall hören oder spüren.

LUBW* sagt dazu:

Infraschall ist ein alltäglicher Bestandteil unserer Umwelt. Er wird von einer großen Zahl unterschiedlicher Quellen erzeugt. Dazu gehören natürliche Quellen wie Wind, Wasserfälle oder Meeresbrandung ebenso wie technische, beispielsweise Heizungs- und Klimaanlage, Straßen- und Schienenverkehr, Flugzeuge oder Lautsprechersysteme in Diskotheken.

* Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

... und Wikipedia:

Windkraftanlagen liefern keinen wesentlichen Beitrag zum Vorkommen von Infraschall in der Umwelt; die von ihnen erzeugten Infraschallpegel liegen deutlich unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwellen.

Es existieren keine wissenschaftlichen Erkenntnisse, die vermuten lassen, dass von Infraschall in diesem Pegelbereich schädliche Wirkungen ausgehen. Wissenschaftlicher Konsens ist, dass der von Windkraftanlagen ausgehende schwache Infraschall keinen gesundheitsschädlichen Einfluss hat.

Für bisweilen geäußerte Befürchtungen, dass von Infraschall Gesundheitsgefahren ausgehen, gibt es keine wissenschaftlich belastbaren Belege. In der öffentlichen und medialen Debatte werden verschiedene Krankheitsbilder wie „Wind Turbine Syndrome“, „Vibro Acoustic Disease“ oder „Visceral Vibratory Vestibular Disturbance“ benutzt, von denen aber keines wissenschaftlich bzw. diagnostisch anerkannt ist.

Windräder oder Photovoltaik?

Windräder und Photovoltaik!

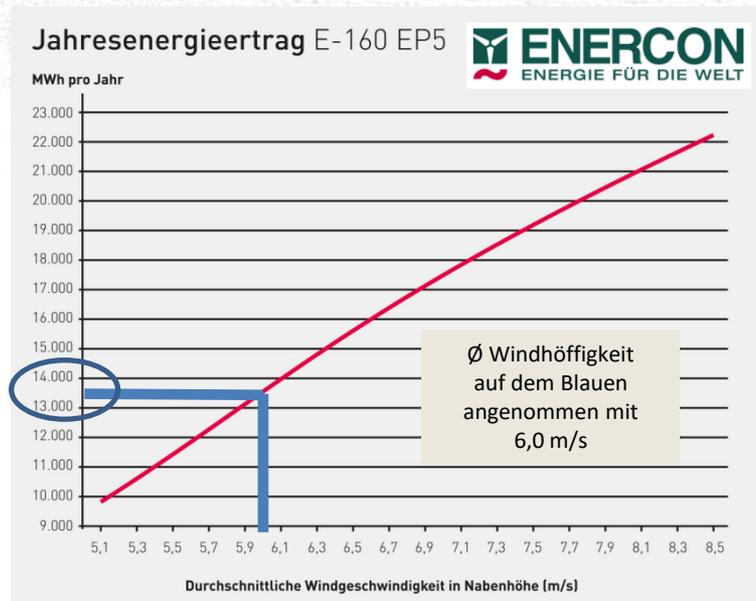
Wir brauchen Beides.

Zu beachten ist jedoch der
Unterschied in der Effizienz.

Es folgt ein Vergleich.

Windrad

ENERCON E-160 EP5



Stromertrag ca. **13,5 Mio. kWh** pro Jahr.
Bei einem Ø-Verbrauch eines Haushalts von 3.000 kWh/Jahr werden damit rund **4.500 Haushalte** versorgt.

Photovoltaik

PV-Anlagen Gesamtgemeinde Schliengen

Installierte PV-Leistung: 6.700 kWp*

*Marktstammdatenregister Stand 16.11.2023

Ø Jahresertrag pro kWp: 1.000 kWh*

*Solarenergie Förderverein für PLZ-Gebiet 79 für 2020-2022

$$\begin{aligned} 6.700 \times 1.000 &= 6.700.000 \text{ kWh} \\ &= 6.700 \text{ MWh} \\ &= 6,7 \text{ GWh} \end{aligned}$$

Stromertrag ca. **6,7 Mio. kWh** pro Jahr.
Bei einem Ø-Verbrauch eines Haushalts von 3.000 kWh/Jahr werden damit rund **2.250 Haushalte** versorgt.

1 Windrad dieses hier als Beispiel angeführten Typs würde auf dem Blauen das Doppelte an Strom erzeugen als alle PV-Anlagen Schliengens zusammen.

**When the winds of change blow,
some people build walls
and others build windmills.**

- Chinese saying -

**Wänn d` Veränderigs-Wind bloose,
baue mänggi Muure,
un anderi baue Windmühle.**

- Chinesisches Sprichwort -