

Windkarten aus dem globalen Windatlas. Die rote Karte in der Nordsee auf der linken Seite bietet einen Kapazitätsfaktor von vielleicht 35-40 %. Bei den blauen Karten würde ich vermuten, dass der Kapazitätsfaktor weniger als 10 % beträgt, wenn überhaupt.

Einige Links und Quellen im Voraus:

[Harvard Studies Find Wind Turbines Raise Local Temperatures](#)

Harvard: [Climatic Impacts of Wind Power \(harvard.edu\)](#)

[Do wind farms change the weather?](#)

[Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences \(copernicus.org\)](#)

Nature: [Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms](#)

Frontiers: [Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes \(frontiersin.org\)](#) [in deutscher Übersetzung hier]

## Temperatur

Es ist nicht sehr bekannt, aber Windkraftanlagen sind das perfekte Instrument für steigende Temperaturen. Studien zeigen, dass die nächtlichen Temperaturen dort, wo Windkraftanlagen in Betrieb sind, um bis zu 1,5 °C steigen.

Nichts davon würde die Wein- und Obstbauern überraschen, die in kühleren Klimazonen Frostventilatoren in ihren Weinbergen und Obstplantagen einsetzen, um die Luft nachts aufzuwirbeln und so zu verhindern, dass Fröste ihre Ernte zerstören.

Auch hier steigen also vor allem die nächtlichen (niedrigen) Temperaturen in Gebieten, in denen viele Windparks in Betrieb sind, und damit die Durchschnittstemperaturen.

Natürlich steigen die Durchschnittstemperaturen auch dann, wenn die Tiefsttemperaturen erhöht werden (nachts wärmer), ohne dass sich die Höchsttemperaturen ändern (die Tagestemperaturen bleiben konstant).



Kampf gegen den Frost in einem Weinstock

### **Lee-Effekte von Windturbinen**

Von [CFACT](#): Die Auswirkung vieler Windturbinen auf Wetter und Klima ist ein kleines, aber aktives Forschungsgebiet. Bei der Windkraft wird Windenergie in Elektrizität umgewandelt, wodurch der Luft Energie entzogen wird.

Die Frage, wie sich der Entzug von Energie auf das Wetter oder das Klima auswirken könnte, wurde bereits 2004 untersucht. Die Studien reichen von den globalen Klimaauswirkungen bis hin zu den lokalen Auswirkungen einer einzelnen großen Windkraftanlage. Einige der Forschungsergebnisse kommen zu dem Schluss, dass eine Maximierung des weltweiten Windausbaus ebenso große Auswirkungen auf das Klima haben könnte wie einige Klimamodelle bei einer Verdoppelung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Wenn man also die gesamte durch Windkraft mögliche Energie ausschöpft, könnten die Auswirkungen



auf das Klima groß sein. Und dies gilt nur für landgestützte Windtürme, so dass viel Offshore-Wind diesen Effekt noch verstärken dürfte.



Lee-Effekte sichtbar gemacht

Windparks sollen auf Tausende von km<sup>2</sup> anwachsen und mit einer Energiedichte von über 30 MW/km<sup>2</sup> installiert werden. Die Windturbinen werden immer höher und größer, mit 12 MW oder sogar 25 MW Nennleistung und Nabenhöhen von 200 Metern. Diese Merkmale wirken sich auf die Energieerzeugung aus, da sich die Windparks gegenseitig beeinflussen, belegen sie doch Onshore- und Offshore-Gebiete. Messungen zufolge verlieren Windparks durch diese Phänomene bis zu 25 % an Energie.. zusätzlich zu den Problemen mit dem Kapazitätsfaktor.

Eine interessante neue Studie von deutschen Wissenschaftlern wurde im Februar 2022 zu Lee-Effekten veröffentlicht (auch im Anhang): [Frontiers | Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes | Marine Science \(frontiersin.org\)](https://www.frontiersin.org)

- Die potenziellen Auswirkungen von Offshore-Windparks durch die Verringerung der Windgeschwindigkeit an der Meeresoberfläche auf den Scherantrieb und seine Folgen für die Ozeandynamik werden untersucht.

- Die Simulationen zeigen die Entstehung einer großräumigen Abschwächung des Windantriebs und damit verbundene Veränderungen in der lokalen Hydro- und Thermodynamik. Die Nachlaufeffekte führen zu einer unerwarteten räumlichen Variabilität in den mittleren horizontalen Strömungen und zur Bildung von großräumigen Dipolen in der Meeresoberflächenhöhe.

- Die induzierten Veränderungen in der vertikalen und lateralen Strömung sind stark genug, um die Restströmungen zu beeinflussen und Veränderungen der Temperatur- und Salzgehaltsverteilung in den Windparkgebieten zu bewirken. Letztlich beeinflussen die dipolbedingten Prozesse die Schichtungsentwicklung in der südlichen Nordsee und weisen auf mögliche Auswirkungen auf marine Ökosystemprozesse hin. Insbesondere in der Deutschen Bucht beobachten wir eine großräumige strukturelle Veränderung der Schichtungsstärke, die schließlich zu einer Verstärkung der Schichtung während des Rückgangs der Sommerschichtung zum Herbst hin führt.

### **Gesetz von Betz zur Umwandlung von Wind in Energie**

Das Betz-Gesetz definiert die maximale kinetische Energie in der Luft, die ein Rotorblatt einfangen kann... wenn wir das absolute Maximum erreichen würden, würde dies den Wirkungsgrad von Windkraftanlagen von derzeit bis zu 45 % auf maximal 60 % erhöhen... also eine Steigerung um 30 %, die weit von dem Vielfachen entfernt ist, das erforderlich wäre, um Windkraftanlagen in Bezug auf die Netto-Energieeffizienz (eROI) konkurrenzfähig mit konventionellen Formen der Stromerzeugung zu machen.

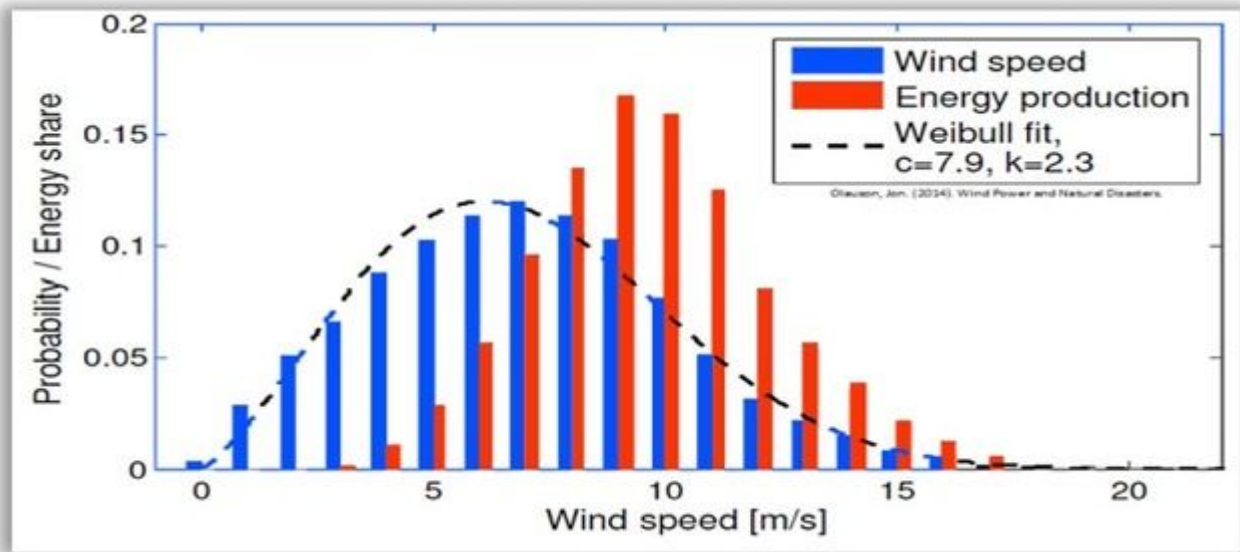
### **Windverteilung und „Weibull-Kurve“ – die Betz-Effizienz:**

$$P = \frac{1}{2} C_p * A * \rho * V^3$$

Darin ist  $\rho$  die Dichte der Luft, A der Bereich des Rotors der Turbine und V die Windgeschwindigkeit.

Die kubische Abhängigkeit der Leistungsabgabe von der Windgeschwindigkeit führt zu einem raschen Anstieg der Stromerzeugung (in der Abbildung unten rot dargestellt). Wenn die ausgelegte Windgeschwindigkeit erreicht ist, ist die elektrische Leistung „gesättigt“. Die Leistung einer Windturbine ist so ausgelegt, dass sie bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit in die Sättigung geht, in der Regel bei 12 m/sec. Eine Windturbine sollte bei einer Windgeschwindigkeit von 17 m/sec 22-mal mehr Strom erzeugen als die gleiche Windturbine bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 6 m/sec. Die elektrische Leistung der Windkraftanlage wird jedoch nahezu konstant gehalten, was zu einem Verlust an Effizienz führt. Wenn die Windgeschwindigkeit über ~25 m/s ansteigt, wird die Windturbine

gefedert, um eine Zerstörung zu vermeiden. Die Rotorsteuerung ermöglicht den Betrieb der Windkraftanlage bei hohen Windgeschwindigkeiten, ohne die Windmühle zu zerstören.



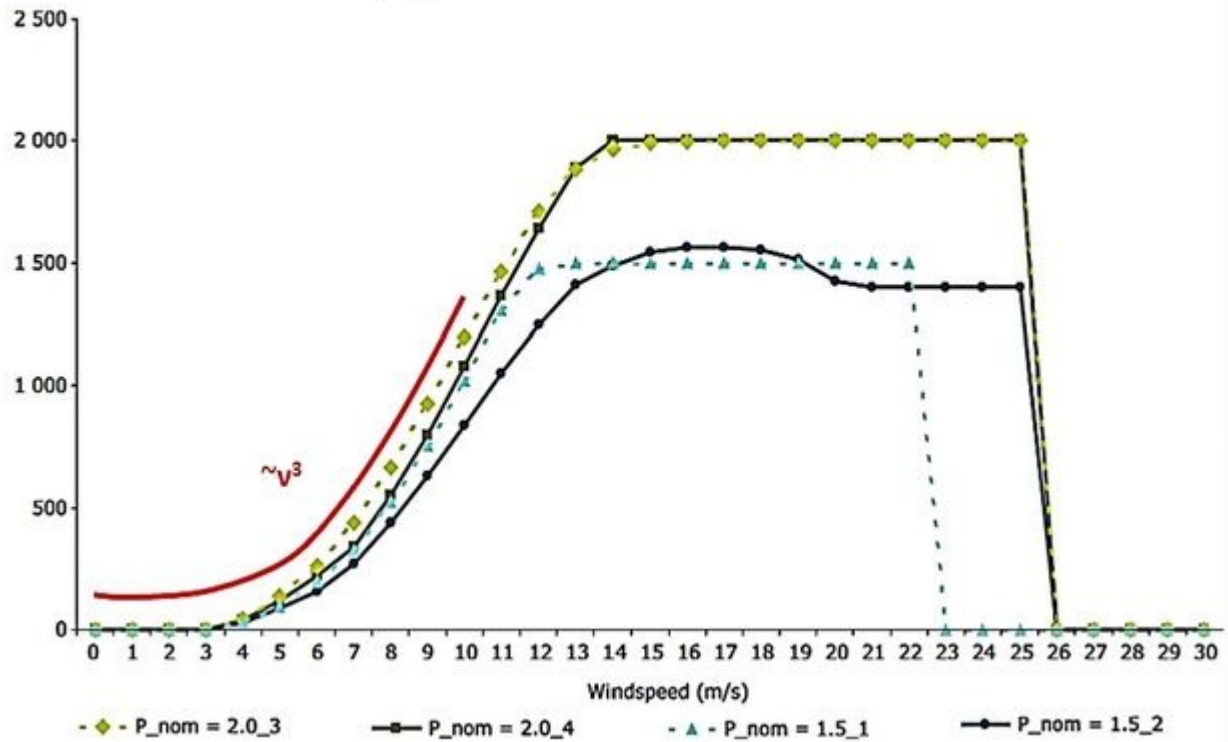
Verteilung der Windgeschwindigkeit nach Weibull. Quelle: Weibull, W. J. Appl. Mech. 18, 293-7 (1951)

Bei einer gemessenen (~Weibull) Windverteilung ist die Energieabgabe einer gut konzipierten Windturbine (die roten Balken in der obigen Abbildung) zu den Zeitintervallen mit hoher Windgeschwindigkeit hin geneigt, wie in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Leistung von Windturbinen ist variabel und sporadisch, eine Folge der typischen Windschwankungen. Die in der obigen Gleichung zum Ausdruck kommende Physik besagt, **dass bei Windgeschwindigkeiten unter 5 m/sec nur wenig und bei Windgeschwindigkeiten über 25 m/s überhaupt keine Leistung erzeugt werden kann** (siehe Abbildung unten).

Eine Windturbine, die für den Betrieb bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s ausgelegt ist, erreicht zwar einen hohen Kapazitätsfaktor bei 5 m/s Wind, aber die Energieausbeute ist von Natur aus sehr gering. Eine in Betrieb befindliche Windturbine ist ein Kompromiss, der durch die Weibull-Windverteilung und die Optimierung des Energieertrags bestimmt wird (siehe Abbildung unten). In dieser Hinsicht unterscheidet sich ein Windpark stark von einem PV-Park.

### Power-velocity curves of four existing wind turbines

Generated power (kW) Source: Hoogwijk, 2008.



Leistungs-Geschwindigkeits-Kurven von vier bestehenden Windkraftanlagen.  
Quelle: Hoogwijk 2008