

Ob Windräder den Wind ausbremsen und welchen Einfluß dies auf das Mikroklima hat, wird kontrovers diskutiert. Daher erscheint es sinnvoll, zunächst grundsätzliche Sachverhalte aufzuzeigen. Der Begriff „Erneuerbare Energie“ und die physikalischen Limitierungen für Windrädern (WEA) werde betrachtet. Weiterhin werden die Leistung und die physikalischen Grenzen der Optimierung von WEA erklärt. Die oft falsch verwendeten Begriffe Energie und Leistung werden beleuchtet. Auch wird die These betrachtet, durch immer größere Windräder sei eine erhebliche Steigerung der Leistung möglich. Es wird gezeigt, wie durch die Entnahme von Energie aus der Luft die Windgeschwindigkeit vermindert und die Leistung von Windparks beeinflusst wird. Der Einfluß auf das Mikroklima wird erklärt und ein Ausblick zur der Energie-Entnahme aus der Atmosphäre gegeben. Der Atmosphäre über Deutschland wird durch Windräder täglich Energie von 20 Hiroshima-Bomben entzogen.

Vorbetrachtung - woher kommt die Energie für die Windräder?

Die Bezeichnung „Erneuerbare Energien“ ist ein Euphemismus, denn Energie kann nicht „erneuert“, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Dies ist der Energieerhaltungssatz der Physik, auch als 1. Hauptsatz der Thermodynamik bekannt. Versuche, diesen zu umgehen, sind unter der Bezeichnung „Perpetuum Mobile“ bekannt, und allesamt gescheitert. Wenn ein Windrad Strom erzeugt, oder besser gesagt, elektrische Energie, dann muss diese aus einer primären Energiequelle kommen. Dies ist der Wind, oder besser gesagt, die kinetische Energie (Bewegungs-Energie) der Luft. Doch auch die Luft bewegt sich nur unter Zufuhr von Energie. Diese Energie liefert die Sonne, welche Thermik (warme Luft) erzeugt und im Zusammenspiel mit kälterer Luft, Ausgleichs-Strömungen verursacht, den Wind. Die Sonne wiederum ist ein Kernkraftwerk, genauer gesagt ein Kernfusions-Kraftwerk, welches Wasserstoff- zu Helium-Kernen verschmilzt. Der dabei auftretende Massenverlust „m“ wird, gemäß der wohl bekanntesten Einstein-Formel $E = mc^2$ in Wärmeenergie umgewandelt (E-Energie, c-Lichtgeschwindigkeit). Die Sonne liefert der Erde seit diese existiert elektromagnetische Strahlungsenergie, uns als Licht bekannt. Und sie wird dies noch einige Mrd. Jahre tun, bis sie zum „roten Riesen“ wird. Das „Kernfusions-Kraftwerk Sonne“ liefert der Erde Strahlungs-Energie für eine sehr lange Zeit. Man könnte dies als „nachhaltig“ bezeichnen, nicht aber als „erneuerbar“.

Die Physik der Windturbine

Die Energie, die ein Windrad (WEA) antreibt, ist die kinetische Energie, die Bewegungsenergie (E) des Windes. Sie wird durch die Formel $E = \frac{1}{2} m v^2$ beschrieben (m- Masse der Luft, v – Geschwindigkeit) mit der Maßeinheit (Ws). Ersetzt man die Masse der Luft durch deren Dichte ρ und das Volumen V, welches die Rotorfläche A mit der Geschwindigkeit v anströmt, erhält man die dem Windrad dargebotene Wind-Leistung (P) zu $P = \frac{1}{2} A \rho v^3$ (Maßeinheit W). Um von der jeweiligen Rotorfläche unabhängig zu sein, wird die Leistung (P) ins Verhältnis zur Rotor-Fläche (A) gesetzt. Pro Quadratmeter Rotorfläche wird der WEA also eine Leistungsdichte (P_d - *power-density*) von $P_A = P_d = \frac{1}{2} \rho v^3$ (Maßeinheit W/m²) dargeboten. Der Begriff „Leistungsdichte“ bezieht sich hier auf die Leistung (W) pro Quadratmeter (m²) Rotorfläche. Die Dichte der Luft ist $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$. Diese kann für die Abschätzung als konstant betrachtet werden, da sie linear in die Formel eingeht, während die Geschwindigkeit v mit der dritten Potenz eingeht, was gravierende Auswirkungen hat. Betrachtet sei repräsentativ eine Schwachwindanlage für das Binnenland, wie die Siemens SWT-3.15-142, für welche die technischen Daten des Herstellers bekannt sind. ⁽¹⁾

Die Physik der Windturbine erklärt am Beispiel einer WEA

Laut Datenblatt hat die WEA Siemens SWT-3.15-142 eine Nennleistung von 3,15 MW und eine Leistungsdichte von 199 W/m^2 (Watt pro Quadratmeter Rotorfläche) bei einer Nenn-Windgeschwindigkeit von 11 m/s . Bei dieser Geschwindigkeit bietet ein Quadratmeter Luftsäule dem Windrad eine Leistungsdichte von $P_N = 815 \text{ W/m}^2$ an. Diese ist unabhängig vom Typ der WEA, da sich dieser Wert allein auf die anströmende Luftsäule vor der WEA bezieht. Bei größeren Windgeschwindigkeiten wird der WEA eine erheblich größere Windleistung dargeboten. Bei der doppelten Windgeschwindigkeit von 22 m/s wären dies anstatt 815 W/m^2 dann 6.520 W/m^2 , also das Achtfache (wegen der Abhängigkeit von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit, also dem Faktor $2^3 = 8$). Diese hohe Leistungsdichte von $6,52 \text{ kW/m}^2$ Rotorfläche kann die WEA aber nicht umsetzen, weil die Rotordrehzahl und mit ihr die Fliehkräfte der Rotorflügel zu groß wären, so dass der Rotor zerstört würde. Denn die Fliehkraft steigt mit dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit der Rotorflügel. Ohnehin rotieren die Spitzen der Rotorflügel bei Nennwind-Geschwindigkeit mit einer

Bahngeschwindigkeit, vergleichbar mit der eines Formel-1 Autos von etwa 300 km/h . Die Wirkung der Fliehkraft in Abhängigkeit von der Drehzahl kann man an einem Kettenkarussell gut nachvollziehen. Allein die geringe Steigerung der Nennwind-Geschwindigkeit von 11 m/s einer bestimmten WEA im Vergleich zu einer andere WEA mit einer Nennwindgeschwindigkeit von 12 m/s bringt eine Steigerung der vom Wind dargebotenen Leistung von 815 W/m^2 auf 1.058 W/m^2 .

Bei der Nenn-Windgeschwindigkeit von 11 m/s beträgt die dargebotenen Leistungsdichte des Windes 815 W/m^2 Rotorfläche. Daraus generiert die Siemens SWT-3.15-142 (Datenblatt) eine elektrische Leistung von 199 W/m^2 , was einem Wirkungsgrad von ca. $0,25$ entspricht. Bei halber Windgeschwindigkeit von $5,5 \text{ m/s}$ sinkt das Dargebot des Windes von 815 W/m^2 auf 102 W/m^2 (entsprechend $\frac{1}{2}^3 = \frac{1}{8}$). Daran erkennt man den drastischen Leistungsabfall, der dem Windrad dargebotenen Windleistung auf ein Achtel, bei Halbierung der Windgeschwindigkeit. Bei der Einschalt-Windgeschwindigkeit von 4 m/s der o.g. WEA ergibt sich die vom Wind dargebotene Leistung zu 39 W/m^2 und die von der WEA erzeugte Leistung von ca. 10 W/m^2 Rotorfläche. Den höchsten Wirkungsgrad von ca. $0,46$ hat die WEA bei einer Windgeschwindigkeiten von 6 m/s bzw. im Bereich von $5 - 8 \text{ m/s}$, was Windstärke vier (4 Beaufort, moderate Briese) entspricht. Eine Herleitung der Formeln zur Physik der Windturbine kann der Literatur entnommen werden. ⁽²⁾

Der Trugschluss mit der Nennleistung

Oft wird aus dem Begriff der Nenn-Leistung (hier $3,15 \text{ MW}$) der Trugschluß gezogen, dies sei „die reale Leistung“ einer WEA, woraus weitere unzulässige Schlüsse gezogen werden. So wird gern propagiert, ein Windpark versorge „bis zu XYZ“ Haushalte. Dass dies allein für Windgeschwindigkeiten ab Nenn-Windgeschwindigkeit, also etwa ab Windstärke sechs gilt, wird dabei verschwiegen bzw. mit dem Terminus „bis zu“ verbrämt. Dadurch entsteht, nicht nur in der Bevölkerung, sondern auch bei Politikern und Planern ein unrealistisches Zerrbild. Zumal, wenn dies von Journalisten weithin verbreitet wird. So findet sich die Illusion, man könne bei der Windkraft-Planung mit der Nennleistung von WEA rechnen selbst in Dokumenten von Staats-Ministerien. ⁽³⁾ In der Physik führt ein Karussell sich gegenseitig verstärkender Impulse zu einer Resonanz-Katastrophe. In der Politik kann dies bei Trugschlüssen nicht anders sein.

Energie versus Leistung – ein weiterer Trugschluss

Die typische Argumentation von Windkraft-Befürwortern und Presse führt an, welche Energie eine WEA, oder ein Windpark oder alle WEA zusammen, generiert haben. Dies ist im Kontext mit der Versorgungssicherheit kein relevantes Kriterium, sondern ein Trugschluß.

Die Energie (E) ist das Produkt aus Leistung (P) und Zeit (t) - es gilt: $E = P \cdot t$ Die Maßeinheit der Energie ist die Wattsekunde (Ws), daraus abgeleitete Maßeinheiten sind Kilowattstunde (kWh), Megawattstunde (MWh) usw. entsprechend den Zehnerpotenzen.

Aus der Formel $E = P \cdot t$ folgt, dass die erzeugte Energie (E) gering ist, wenn die reale Leistung (P) der WEA entsprechend der Windgeschwindigkeit gering ist. Und dass die Energie (E) gleich Null ist, wenn die Leistung (P) gleich Null ist, falls die Rotoren der WEA stillstehen.

Durch die Argumentation in Energie-Einheiten wird der Eindruck erweckt, man müsse nur eine hinreichende Anzahl WEA aufstellen, um eine sichere Stromversorgung zu realisieren. Dies ist ein völliger Trugschluss, denn dazu müsste die von einer (oder mehreren) WEA erzeugte Energie gespeichert werden, um bei Bedarf zur Verfügung zu stehen. Dies ist angesichts der schieren Dimension völlig unrealistisch. Im Jahr 2021 erzeugten 31.109 WEA in Deutschland in Summe 131,7 TWh, also 360,8 GWh pro Tag. ⁽⁴⁾ Das Pumpspeicherwerk Goldisthal (das größte PSW in Deutschland) hat eine max. Leistung von 1.060 MW, das Wasser (13 Mio. Kubikmeter) reicht bei einer Fallhöhe von 302 m für 9 Stunden. ⁽⁵⁾ Die gespeicherte Energie beträgt also 9.540 MWh bzw. 9,54 GWh (= 1060 MW * 9 h). Um die durch WEA an nur einem Tag (im Durchschnitt) erzeugte Energie zu speichern, bedürfte es etwa 38 PSW Goldisthal. In dieser Rechnung sind die Wirkungsgrad-Verluste beim Pumpen nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt ist die Solar-Stromerzeugung, die nachts stets Null ist. Weiterhin nicht berücksichtigt ist der Umstand, dass Dunkelflauten (ohne Wind und Sonne) mehrere Wochen dauern können. Schätzt man die Tageserzeugung von 360,8 GWh Windenergie in Bezug auf Batterie-Speicher ab, so entspräche dies 3,6 Mio. E-Autos mit großem 100-kWh-Akku. Aber Wind- und Solar-Energie soll noch um Größenordnungen ausgebaut werden. Zur groben Abschätzung kann man dazu die o.g. Zahlen hochrechnen.

Nach jahrelangen Diskussionen über alle möglichen Arten von Speichern, und Forderungen in die Forschung zu investieren, ist man nun beim Hoffnungsträger „grüner Wasserstoff“ angekommen. Jeder, dem der Begriff „Wirkungsgrad“ kein Fremdwort ist, wird erkennen, dass die Erzeugung von Wasserstoff (H₂) mittels Windstrom, seine Speicherung und Rückverstromung eine Wirkungsgrad-Kette bedingt, die dadurch bestimmt ist, dass sich die Wirkungsgrade aller Teilschritte multiplizieren. Der System-Wirkungsgrad ist folglich stets kleiner, als der kleinste Wirkungsgrad aus dieser Kette. Und das Reziproke des Systemwirkungsgrades hebelt den Preis für den so gespeicherten Strom um diesen Faktor nach oben. Man könnte wissen, dass China den weltweit ersten Hochtemperatur-Kern-Reaktor am Netz hat, der auch Wasserstoff durch Dissipation von Wasser in der über 900°C heißen Zone direkt (ohne Umweg über Strom, mit hohem Wirkungsgrad) zu Cent-Beträgen erzeugen kann. ⁽¹³⁾ Wobei in Deutschland, mit sehr viel Fördergeld (besser Steuergeld) gerade das „grüne Perpetuum Mobile“ erfunden wird. Doch dies wäre ein Thema für einen anderen Artikel.

Für alle Belang der Elektrotechnik, einschließlich der öffentlichen Stromversorgung gilt, dass die generierte Leistung zu jedem Zeitpunkt der entnommenen Leistung (Last) entsprechen muß, ansonsten bricht das System

zusammen. Bei einer Wechselspannungs-Versorgung gleicht die Änderung der Netzfrequenz ($50 \pm 0,2$ Hz) Ungleichgewichte zwischen Stromerzeugung und Verbrauch (Last) in geringem Maße aus. Die Netz-Frequenz ist jedoch angesichts einer Phasen-asynchrone Einspeisung aus verschiedenen Quellen (Kraftwerke, Übertragungsleitungen) ein äußerst sensibler Parameter. Deshalb muss zur Vermeidung von Spannung-Spitzen, verursacht durch asynchrone Einspeisung der Sinus-Spannung aus verschiedenen Quellen, zu jedem Zeitpunkt positive und negative Regel-Leistung zur Verfügung stehen, damit sich Einspeisung und Verbrauch die Waage halten. Deshalb ist nicht die Energie, die irgendwann generiert wurde, sondern allein die Leistung relevant, die in jedem Moment der Last (Stromverbrauch) entsprechen muss. Ist dies nicht der Fall, und kann keine positive Regelleistung bereitgestellt werden, hilft nur noch Lastabwurf, sprich die Abschaltung von Strom-Verbrauchern. Dies ist längst Realität durch zeitweise Abschaltung von Aluminium-Hütten und anderen Großverbrauchern⁽⁶⁾. Auf unseren Stromrechnungen findet sich dafür der Posten „Umlage für abschaltbare Lasten“. Das vermeintliche „Windkraft-Paradies“ Kalifornien ist für seine rollierenden Blackouts bekannt, wobei einzelne Regionen zeitweise vom Netz genommen werden, um einen großen und unerwarteten Blackout zu vermeiden.⁽⁷⁾ Unser Strom-Erzeugung läuft nicht nur auf eine Blackout-Gefahr, sondern auch auf eine Strom-Mangelwirtschaft zu Höchstpreisen hinaus.

Die Grenzen der Optimierung von Windrädern

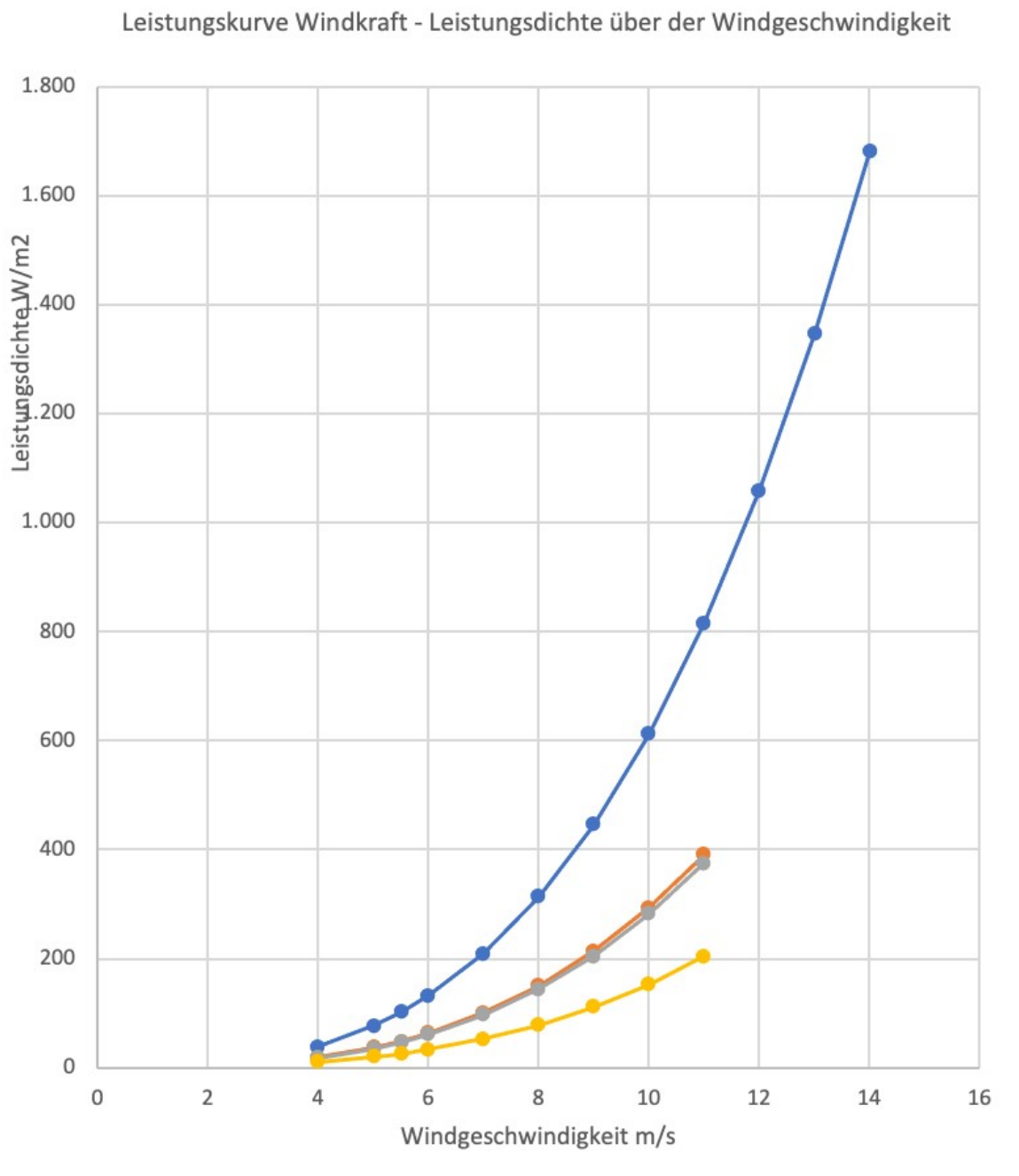
Der physikalisch maximal mögliche (theoretische) Wirkungsgrad von Windrädern beträgt 0,59.⁽²⁾ Da sich dieser Wert ausschließlich auf eine theoretische ungestörte Aerodynamik bei laminarer Strömung bezieht, kann er praktisch nicht erreicht werden. Die Siemens SWT3.15-142 sei dafür ein Beispiel. Sie hat bei Windgeschwindigkeiten von 5-8 m/s ihren höchsten Wirkungsgrad von ca. 0,46. Aus diesem Wert zu schlussfolgern, dass noch reichlich Optimierungs-Potential bis zum theoretischen Wirkungsgrad von 0,59 möglich sei, ist falsch.

Denn alle modernen WEA sind „Dreiflügler“, und damit bereits die physikalisch optimalste Form einer WEA, weil hier die einzelnen Rotorblätter die Anströmung des nachlaufenden Rotorblattes am wenigsten stören. Mehr als drei „Flügel“ würden den Wirkungsgrad nur verringern. Der dafür relevante Parameter ist die „Schnelllaufzahl“, die den praktisch maximalen Wirkungsgrad für „Dreiflügler“ auf 0,48 limitiert.⁽²⁾ Mit anderen Worten, das physikalische Limit für den erreichbaren Wirkungsgrad heutiger WEA liegt bei 0,48 und nicht beim theoretischen Wirkungsgrad von 0,59. Mit einem Wirkungsgrad von 0,46 im optimierten Bereich von 5 – 8 m/s kommt die o.g. Siemens WEA dem theoretischen Limit sehr nahe, zumal jede WEA selbst auch einen Verbrauch durch ihre Elektrik und Mechanik hat. Das technisch realisierbare Potential hinsichtlich Wirkungsgrad-Steigerung ist bei modernen WEA bereits ausgeschöpft. Bei Nennwindgeschwindigkeit der SWT-3.15-142 von 11 m/s beträgt der Wirkungsgrad jedoch nur 0,24. Dies mag zunächst unverständlich erscheinen, denn die WEA hat beim höheren Dargebot an Leistungsdichte des Windes von 815 W/m^2 bei 11 m/s einen geringeren Wirkungsgrad, als bei „halbem Wind“ von 5,5 m/s bei einer Leistungsdichte des Windes von nur 102 W/m^2 . Zur Erklärung sollte man sich folgendes vergegenwärtigen. Das Rotorblatt eines Windrades funktioniert wie der Tragflügel eines Segelflugzeuges, dessen Profil den bestmöglichen „Auftrieb“ bestimmt, sprich den höchsten Wirkungsgrad bei einer ganz bestimmten Geschwindigkeit. Da die o.g. WEA eine „Schwachwindanlage“ für das Binnenland ist, wurde die Geometrie der Rotorflügel auf Geschwindigkeiten von 5-8 m/s optimiert, so dass sie bei 11 m/s einen geringeren Wirkungsgrad haben muss. Auch daran sieht man, wie die WEA-Hersteller ihre Anlagen technisch optimiert haben. Dies ist der Grund, warum man heute keine Offshore-Anlagen im Binnenland aufstellt, die für höhere Windgeschwindigkeiten optimiert sind. Denn im Binnenland weht häufiger eine „mäßige Brise“ mit 4 Beaufort, als eine „frische Brise“ oder

„starker Wind“ mit 5-6 Beaufort. Im übertragenen Sinne wird also im Binnenland keine fette Kuh auf fetter Wiese (wie in Irland) gemolken, sondern einer mageren Kuh durch Optimierung der Melkanlage, auch noch letzte Tropfen Milch abgepreßt.

Die „Dreiflügler-WEA“ ist mit einem maximal möglichen Wirkungsgrad von 0,48 die effektivste Form. ⁽²⁾ Der technisch realisierbare Spielraum ist damit de facto Null, wie die SWT-3.15-142 mit einem Wirkungsgrad von 0,46 im aerodynamisch optimierten Bereich von 5-8 m/s Windgeschwindigkeit zeigt. Die Ingenieur-Technik hat ausgeschöpft, was es auszuschöpfen gab. Doch die Gesetze der Physik können dabei, und vielleicht entgegen mancher Wunschvorstellung, nicht überwunden werden.

Quelle: Eigene Berechnungen, Formeln gem. ⁽²⁾



Die o.g. grafische Darstellung soll die Situation veranschaulichen. Alle Kurven zeigen die Leistungsdichte in W/m^2 Rotorfläche Die **blaue Kurve** stellt die vom Wind dargebotene Leistungsdichte dar.

Die **orange Kurve** zeigt die von einem „Dreiflügler“ umsetzbare Leistungsdichte bei dem maximal möglichen Wirkungsgrad von 0,48.

Die **graue Kurve** zeigt die Leistungsdichte bei dem real höchsten Wirkungsgrad von 0,46 der o.g. Siemens WEA. Relevant ist diese Kurve nur im Bereich von 5 – 8 m/s.

Die **gelbe Kurve** repräsentiert die Leistungsdichte bei Nenn-Windgeschwindigkeit von 11 m/s. Alle Kurven beginnen bei der Einschalt-Windgeschwindigkeit von 4 m/s und enden bei der Nenn-Windgeschwindigkeit von 11 m/s. Nur die blaue Kurve, mit der vom Wind dargebotenen Leistungsdichte, geht bis 14 m/s bei der Windstärke 7 beginnt.

Dies mag vielleicht manche Illusionen in Bezug auf die Windkraft zerstreuen? Das Dargebot an Leistungsdichte des Windes steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Jedoch sind sehr hohe Windgeschwindigkeiten (ab 6 Beaufort, 11 m/s) im Binnenland selten.

Außerdem müssen die Rotorflügel dann aus dem Wind gedreht werden. Man kann sich bei Windgeschwindigkeiten $> 11 \text{ m/s}$ die **gelbe Kurve** bei etwa $200 \text{ W}/\text{m}^2$ waagrecht verlängert bis zur Abschalt-Geschwindigkeit von 22,5 m/s vorstellen. Über den gesamten Arbeitsbereich der WEA (4 – 22,5 m/s) variiert die Leistungsdichte zwischen 30 bis $200 \text{ W}/\text{m}^2$. Das gesamte Wirken der WEA spielt sich praktisch zwischen der **gelben** und der **grauen Kurve** ab. Die **graue Kurve (Wirkungsgrad 0,46)** zeigt auch, dass der maximale Wirkungsgrad eines Dreiflüglers (0,48 **orangene Kurve**) faktisch erreicht ist und sich nicht mehr steigern lässt. Im optimierten Bereich zwischen 5 – 8 m/s werden Leistungsdichten um die $100 \text{ W}/\text{m}^2$ plus/minus erreicht. Das heißt, durch einem Quadratmeter Rotorfläche könnte etwa eine 100 W Glühbirne betrieben werden. Daran erkennt man den gigantischen Materialaufwand bei einem Windrad, um eine sehr überschaubare elektrische Leistung zu generieren. Doch damit nicht genug, die in der o.g. Grafik oder u.g. in der Tabelle genannten Leistungsdichten gelten nur, solange der Wind mit der betr. Geschwindigkeit weht. Da dies nicht immer der Fall ist, gibt es den Begriff der Volllaststunden, welcher die Stunden-Zahl angibt, bei der so getan wird, als liege während dieser Zeit Nennleistung an. Bei einer Jahresstunden-Zahl von 8.760 entsprechen realistische 20% mittlerer Auslastung einer Volllaststunden-Zahl von 1.752. Legt man dies im Vergleich zu Grunde, reduzieren sich die o.g. $100 \text{ W}/\text{m}^2$ im Mittel auf ca. $20 \text{ W}/\text{m}^2$. Die beachtliche Megawatt Nennleistung einer WEA kommt also allein aufgrund ihrer schieren Größe zu Stande. Aus dem Rotor-Durchmesser von 142 m ergibt sich eine Rotorfläche von 15.829 m^2 , was über zwei Standard-Fußballfelder entspricht. Eine WEA kombiniert einen riesigen Materialaufwand mit einer sehr geringen Leistungsdichte.

Dies hat seinen physikalischen Grund in der geringen Dichte der Luft, denn in die Formel der Leistungsdichte geht neben der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit auch die geringe Dichte der Luft von ca. $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$ ein. Wasser hat eine Dichte von $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$, und ist damit um das über 800-fache größer als die Dichte der Luft. Da für eine Wasserturbine die gleiche Physik in Bezug auf die Strömungs-Geschwindigkeit des Mediums gilt, ist die Leistungsdichte einer Wasserturbine um mehr als das 800-fache größer, als die einer Windturbine. Wobei noch ein höherer Wirkungsgrad hinzukommt.

Quellen:

(1) Technische Daten Siemens SWT-3.15-142

<https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1469-siemens-swt-3.15-142>

(2) **Physik der Windturbine** <https://home.uni-leipzig.de/energy/energie-grundlagen/15.html>

(3) Beschreibung des Windes: Die Weibull-Verteilung <https://wind-data.ch/tools/weibull.php>

(4) Turbinen schwächen die Windenergie <https://www.mpg.de/9379767/windenergie-wind-strom>