

Theoretische Berechnung der Effizienz von Windkraftanlagen in Abhängigkeit von der installierten Leistung

geschrieben von Admin | 10. April 2023

von Dr. Francesco Cester

Ein Aspekt, der m. A. n. in den Artikeln über die sog. erneuerbaren Energien zu selten berücksichtigt wird ist die Tatsache, dass sich mit zunehmender Installation der Erntefaktor von Wind- und PV-Anlagen drastisch verschlechtert.

Würde sich die installierte Leistung der Windkraft in Deutschland von den aktuellen ca. 60 auf 120 GW verdoppeln, bestünde viel häufiger die Notwendigkeit der Abregelung eines großen Teils der erzeugten elektrischen Leistung als momentan der Fall ist. Das würde sich auf die durchschnittliche Jahresleistung der Anlagen auswirken, die deutlich unter der jetzigen, ungefähren 25 % der installierten Leistung, liegen würde.

Ein weiterer Aspekt ist die Tatsache, dass bei einer Lebensdauer von 20 Jahren, jedes Jahr ca. 5% des gesamten Windanlagenbestands durch neue Windturbinen ersetzt werden muss. Das bedeutet, dass pro Tag im Durchschnitt Tag etwa 2 neue 5-MW-Windkraftanlagen erstellt und installiert, und ca. 4 alten deinstalliert und gesamt Fundament beseitigt werden müssten, um die aktuelle Windkraftleistung zu behalten. Ich will nicht von Geldkosten reden. Was kostet aber eine solche Aktion allein an Energie?

Aber kommen wir zum ersten Aspekt zurück:

Wie lange bleibt der Erntefaktor bei zunehmender installierter Leistung noch günstig?

Die Antwort auf diese Frage lässt sich durch eine theoretische Berechnung der Windkrafteffizienz in Abhängigkeit von der Installation der Windturbinen geben.

Bei dieser Berechnung gehe ich von einer idealen Sachlage aus:

1. Ich nehme an, dass nur Windgeschwindigkeiten auftreten, die die Windkraftanlagen zwischen 0 und ihrer installierten Leistung (100%) antreiben können.
2. Ich gehe von einer gleichmäßigen Verteilung der Windgeschwindigkeiten aus. Ich nehme also an, dass für ein

bestimmtes, genug langes Zeitintervall jede Windstärke zwischen 0 und 100% mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten kann.

3. Ich setze voraus, dass Stromspeicher nicht vorhanden seien und dass somit, überschüssige Leistungen, die den nationalen Strombedarf übersteigen, abgeregelt werden müssen.
4. Der Einfachheit halber wird in der Berechnung ein über die Zeit konstanter nationaler Strombedarf verwendet, der dem mittleren Stromleistungsbedarf entspricht (für Deutschland ca. 60 GW).
5. In der Berechnung wird die Proportionalität der Leistung der Windturbinen zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit berücksichtigt.

Unter diesen Bedingungen konnte ich für die Berechnung des Windkraftanteils an der Stromproduktion folgende Relation herleiten (für die Herleitung verweise ich auf das Ende des Artikels):

$$\text{WKAnteil} = 1 - 0.75Q^{-1/3}$$

wobei Q der Quotient aus der installierten Windkraftleistung und dem mittleren Stromleistungsbedarf darstellt.

Es ist zu berücksichtigen, dass die erwähnte Relation nur für Werte von $Q \geq 1$ gültig ist. Das bedeutet, dass die Formel für die Berechnung des Wirkungsgrades der Windkraft nur dann verwendet werden kann, wenn die gesamte installierte Windkraftleistung gleich oder größer als der mittlere Stromleistungsbedarf ist. Die Formel kann also für Deutschland verwendet werden, da zurzeit (April 2023) die installierte Windkraftleistung ca. dem mittleren Stromleistungsbedarf des Landes entspricht.

Für die Berechnung des aktuellen Wirkungsgrades der Windturbinen in Deutschland können wir dann in der Formel $Q = 1$ setzen und so erhalten wir einen Wert des Windkraft-Anteils an der Stromerzeugung gleich 0.25.

Für andere Werte des Faktors Q (zukünftige Vision) werden hier unten die entsprechenden mittleren Beträge der Stromerzeugung und des Wirkungsgrades der Windkraft in Deutschland bei gleichbleibendem Stromleistungsbedarf (60 GW) wiedergegeben.

Installierte Leistung Q-Faktor WK-Anteil an der Stromerzeugung
Wirkungsgrad

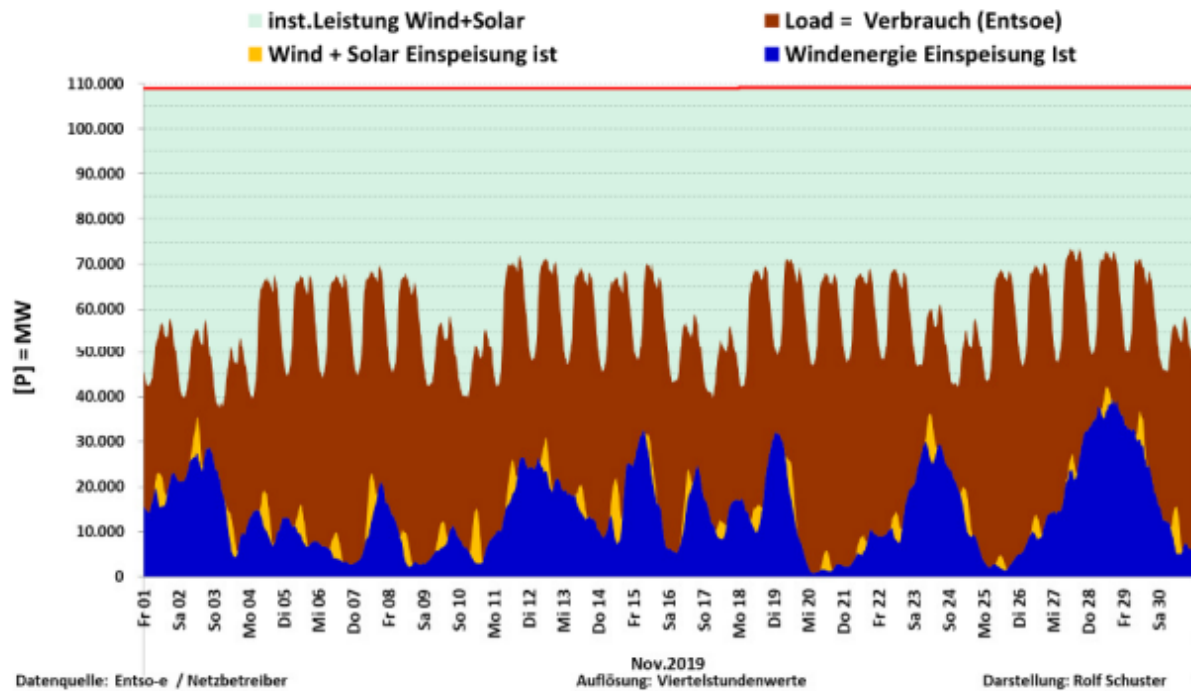
| Installierte Leistung | Q-Faktor | WK-Anteil an der Stromerzeugung | | Wirkungsgrad |
|-----------------------|----------|---------------------------------|---------|--------------|
| 60 GW | 1 | 25% | (15 GW) | 25% |
| 120 GW | 2 | 40% | (24 GW) | 20% |
| 180 GW | 3 | 48% | (29 GW) | 16% |
| 240 GW | 4 | 53% | (32 GW) | 13% |
| 300 GW | 5 | 56% | (34 GW) | 11% |
| 600 GW | 10 | 65% | (39 GW) | 6.5% |

Im Endergebnis zeigt es sich:

1. Um eine Verdoppelung des aktuellen Stromerzeugungsanteils der Windkraft zu erzielen, wäre mindestens eine Verdreifachung der installierten Leistung der Windturbinen von 60 auf 180 GW notwendig, und nicht die einfache Verdoppelung sowie es sich viele „Experten“ vorstellen.
2. Ein Stromerzeugungsanteil aus Windkraft über 50% wäre impraktikabel.
3. Wegen der erforderlichen Zunahme der Abregelungen bei steigender Installation reduziert sich die Effizienz der Windkraftparks drastisch.

Ein Vergleich mit echten Daten zeigt die Zuverlässigkeit dieser rein theoretisch erzielten Ergebnisse.

Folgende Abbildung zeigt den nationalen Stromverbrauch (in braun) und die Wind- und Solarstromerzeugung in November 2019. Die blau gefärbte Fläche entspricht dem Stromerzeugungsanteil der Windenergie. Eine vierfach größere Installation der Windkraftleistung würde mit einer Dehnung der blauen Fläche um den Faktor 4 nach oben einhergehen. Die Kontur dieser Fläche würde zeigen, dass trotz dieser großen Installation im Bereich zwischen dem 4. und dem 11., sowie um dem 20. und dem 26. November, nur ein kleiner Anteil des Strombedarfs durch die Windkraft gedeckt wäre. In den restlichen Zeitintervallen, andererseits, würden große Bereiche der blauen Fläche oberhalb des Stromverbrauchs gelangen, so dass starke Drosselungen der Windkraftleistung erforderlich wären. Unter diesen Bedingungen, trotz vierfacher Installation, wäre der Anteil an der Stromproduktion durch die Windenergie nicht viel größer als 50%. Eine weitere Erhöhung der Installation würde noch mehr Abregelungen erfordern und somit den Wirkungsgrad der Windkraft weiter verschlechtern.



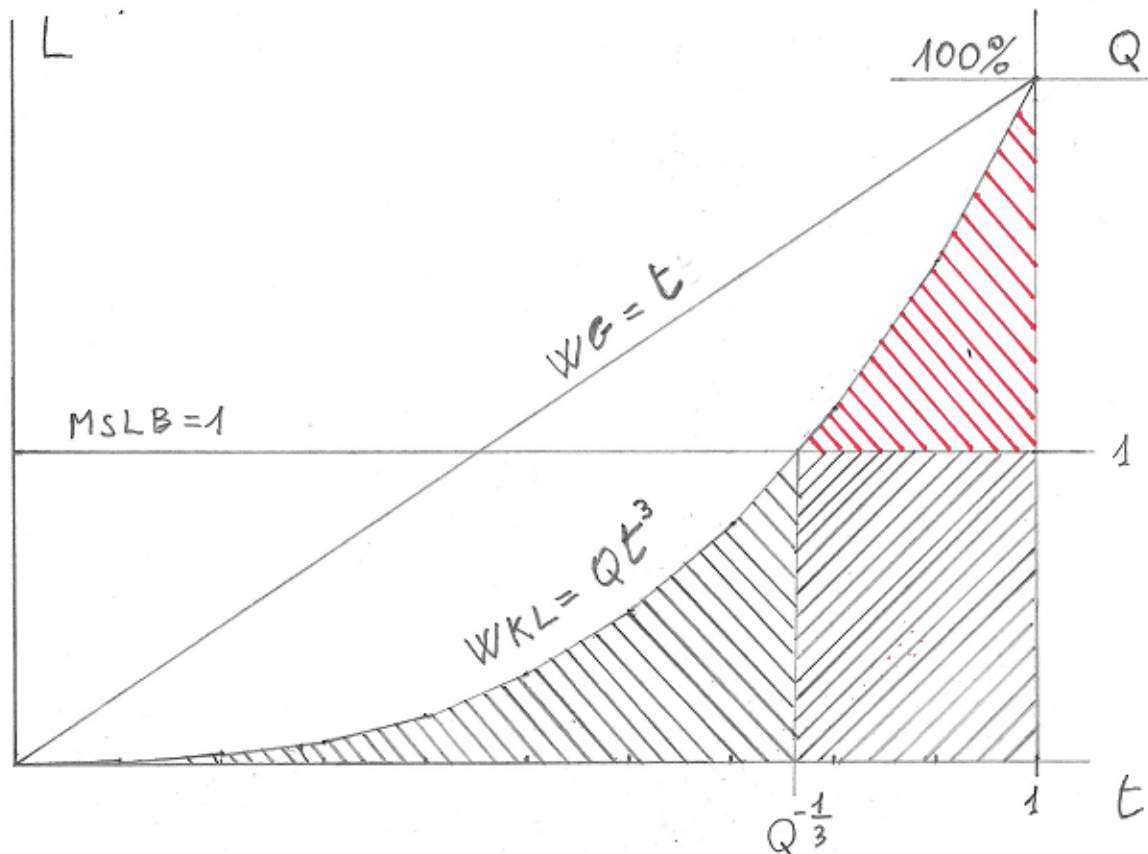
Man könnte einwenden, dass mit dem Vorhandensein von Stromspeichern Abregelungen der Windkraft nicht notwendig seien. Dabei weisen die meisten Windkraftbefürworter auf die Power-to-Gas-Technologie hin. Dass diese Rechnung nicht aufgehen kann, zeigt folgende Überlegung.

Stellen wir uns für Deutschland einen durchschnittlichen Strombedarf von 60 GW bei einer installierten Windkraftleistung von 180 GW vor.

Unter diesen Bedingungen lässt sich, bei optimaler Windstärke über das ganze Land, eine bis zu 80%-ige Stromproduktion von ca. 140 GW erreichen. 60 GW davon könnten theoretisch direkt ins Stromnetz eingespeist werden. Die restlichen 80 GW müssten aber gespeichert werden. Nun frage ich mich, wie die Dimensionierung der notwendigen Elektrolyse-Anlagen aussehen soll, die diese Leistung aufnehmen können? Können Sie sich eine Installation an Elektrolyseuren vorstellen, die mehr Leistung aufnehmen kann als das ganze Land?

Herleitung der Relation zur Berechnung des Windkraftanteils an der Stromproduktion in Abhängigkeit von der installierten Leistung.

Zur Herleitung der Relation für die Berechnung des Windkraftanteils an der Stromproduktion dient folgende Graphik, in der Leistung (L) in Abhängigkeit von Zeit (t) dargestellt wird.



Die mit „MSLB“ gekennzeichnete horizontale Gerade stellt den mittleren Stromleistungsbedarf dar (auf den Wert 1 normiert).

Die Dauer des Gedankenexperiments wird auf 1 gesetzt (normiert).

Für die Windgeschwindigkeit wird angenommen, dass alle möglichen Werte zwischen Windstillstand und optimaler Windstärke (100% Leistungserzeugung) mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten können.

Gemäß den oben beschriebenen Bedingungen beschreibt die Ursprungsgerade „WG“ mit Steigung 1 eine mögliche Windgeschwindigkeitsverteilung. Dabei wird der Fall betrachtet, bei dem die Windgeschwindigkeit im betrachteten Zeitintervall gleichmäßig von 0 bis 100% steigt.

Es ist zu berücksichtigen, dass, trotz ihrer Einfachheit, diese durch die Gerade „WG“ dargestellte Verteilung echte Windgeschwindigkeitsverteilungen sehr gut simuliert. Denn der Windkraftanteil an der Stromproduktion ist von der Reihenfolge, mit der die Windgeschwindigkeiten vorkommen, unabhängig. Also bei einer beliebigen echten Verteilung lassen sich die niedrigsten Windgeschwindigkeiten am Anfang und die höchsten am Ende der Zeitachse einordnen, ohne Beeinträchtigung der Berechnung.

Zu dieser Windgeschwindigkeitsverteilung beschreibt die Funktion WKL die

Windkraftleistung zur Stromerzeugung (Proportionalität zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit). Der maximale Wert Q der Funktion entspricht dem Quotient aus der installierten Windkraftleistung und dem mittleren Stromleistungsbedarf.

Unter diesen idealen Bedingungen:

Die schwarzschrattierte Fläche unterhalb der Gerade MSLB stellt die Energie dar, die direkt in das Stromnetz eingespeist werden kann.

Die rotschrattierte Fläche oberhalb der Gerade MSLB stellt die Energie dar, die abgeregelt werden muss.

Da der Stromenergiebedarf (rechteckige Fläche zwischen $t=0$ und 1 unterhalb von MSLB) auf 1 normiert ist, stellt der Inhalt der schwarzschrattierten Fläche den Anteil an der Stromerzeugung (WKAnteil) durch die Windkraft dar, den wir als Summe zweier Flächeninhalte folgendermaßen berechnen können:

$$\text{WKAnteil} = \int_0^{Q^{-\frac{1}{3}}} Qt^3 dt + 1 \left(1 - Q^{-\frac{1}{3}}\right) \rightarrow$$

$$\text{WKAnteil} = Q \left[\frac{1}{4} t^4 \right]_0^{Q^{-\frac{1}{3}}} + 1 - Q^{-\frac{1}{3}} \rightarrow$$

$$\text{WKAnteil} = \frac{1}{4} Q^{-\frac{1}{3}} + 1 - Q^{-\frac{1}{3}} \rightarrow$$

$$\text{WKAnteil} = 1 - 0.75Q^{-\frac{1}{3}}$$

Eine besondere Bedeutung kommt dem Wert $Q^{-1/3}$ der Abszisse des Schnittpunktes der MSLB und WKL Funktionen zu. Er stellt in Prozent den Grenzwert der Windgeschwindigkeit dar, oberhalb dessen die Windkraftleistung gedrosselt werden muss.

Beispiel: Bei einem mittleren Stromleistungsbedarf von 60 GW und einer Windkraftinstallation von 180 GW (Q -Faktor = 3), wäre der Grenzwert $Q^{-1/3} = 0.70$. Das bedeutet, dass schon ab 70% der optimalen Windgeschwindigkeit Windkraftleistung abgeregelt werden müsste.

Über den Autor:

Dr. Ing. Francesco Cester

Ausbildung: Doktor in nuklearem Ingenieurwesen bei der Universität Sapienza in Rom

**Berufserfahrung: Wissenschaftlicher Softwareingenieur bei der
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS)**

E-Mail: f.cester-physik@gmx.de

Website: <https://newton-relativity.com/>