

Wind und Solar – Natürliche Bedingungen für die Stromerzeugung

geschrieben von Chris Frey | 18. Juli 2024

Dr. Lars Schernikau

[Linkedin](#) [Instagram](#) [YouTube](#) [Twitter](#)

[Alle Hervorhebungen in diesem Beitrag im Original]

Die „natürlichen Kapazitätsfaktoren“ sind weltweit ein direktes Ergebnis des Standorts der Wind- oder Solaranlage.

Sie sind in keiner Weise von der eingesetzten Technologie abhängig und können nicht beeinflusst werden.

Anmerkung: Dieser Artikel erschien ursprünglich im Englischen. Wir übersetzen hier das englische „capacity factor“ mit „Kapazitätsfaktor“. Kapazitätsfaktor wird allerdings oft auch als „Nutzungsgrad“ bezeichnet.

Wenn es um die Stromerzeugung geht, werden Begriffe wie Kapazitätsfaktor („capacity factor“), Auslastung („utilization“) und Lastfaktor („load factor“) oft wie Konfetti bei einer Parade herumgeworfen. Dabei sind diese Begriffe nicht gleichbedeutend miteinander. Der Begriff „Kapazitätsfaktor“ wird in der Presse, sicherlich auch in der Politik und sogar unter „Energieexperten“, oft verwirrend verwendet.

Das ist allerdings verständlich. Zu wissen, was Begriffe wie „natürlicher Kapazitätsfaktor“ (nCF), „Auslastung“, „Lastfaktor“ und „Wirkungsgrad“ wirklich bedeuten und was mit weiteren Investitionen beeinflusst/verbessert werden kann, ist meiner Meinung nach ein entscheidendes Teil des Puzzles „erneuerbare Energien“ ... nun, wie immer bei einem Puzzle sollten wir mit einigen Eckpfeilern beginnen

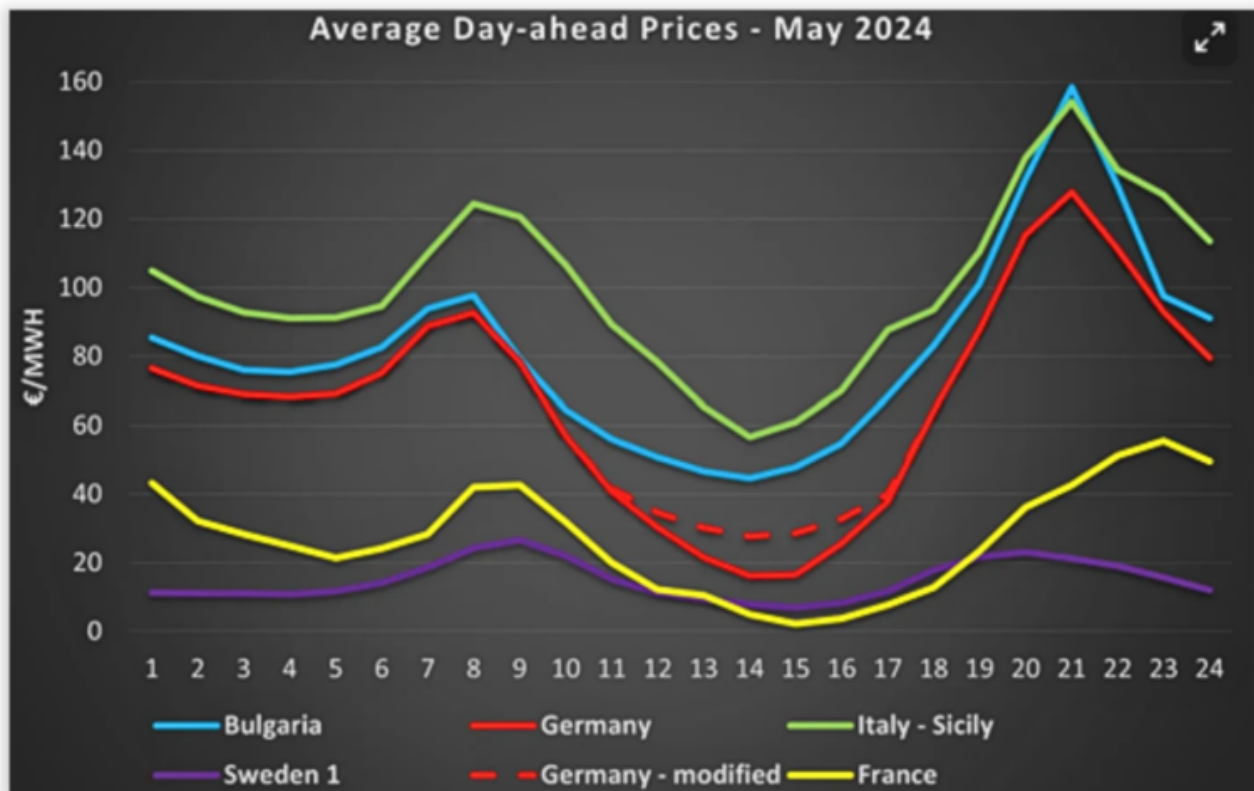


Abbildung 1: Volatilität der europäischen Strompreise. **Anmerkung:** Durchschnittliche Marktpreise für 5 Länder. Für Deutschland wird eine modifizierte Kurve dargestellt, bei der negative Preise stattdessen auf 0 gesetzt wurden, um die Auswirkungen großer negativer Preise auf die Durchschnittspreise hervorzuheben. – **Quelle:** Julian Jumaux substack, Juni 2024, basierend auf öffentlich zugänglichen Informationen

1. Natürlicher Kapazitätsfaktor (nCF), Auslastung, Lastfaktor und Wirkungsgrad... was bedeutet das alles?

Der „natürliche Kapazitätsfaktor (nCF)“ ist der Prozentsatz der maximal möglichen Leistung des „Kraftwerks“ (Kohle, Gas, Kernkraft, Sonne, Wind, Wasser usw.), die unter den natürlichen Bedingungen des Standortes erreicht wird, wobei keine betrieblichen oder technischen Störungen oder Ausfälle angenommen werden.

Um Verwirrung zu vermeiden, verwende ich in meinen Texten nach Möglichkeit den Begriff „natürlicher Kapazitätsfaktor“ anstelle des kürzeren „Kapazitätsfaktors“.

Ich definiere „Auslastung“ als den prozentualen Anteil der im Jahresdurchschnitt genutzten tatsächlich verfügbaren Leistung des Kraftwerks, der nur durch technische, betriebliche oder wirtschaftliche Ausfälle oder Kürzungen reduziert wird... völlig unabhängig vom natürlichen Kapazitätsfaktor nCF.

Der „Netto-Lastfaktor“ ist – nach meiner Definition – das Produkt aus

natürlichem Kapazitätsfaktor und Auslastung.

- *natürlicher Kapazitätsfaktor (nCF) x Auslastung = Nettolastfaktor*

Wenn wir also vom natürlichen Kapazitätsfaktor sprechen, beziehen wir uns nur auf den von der Natur abgeleiteten Kapazitätsfaktor, nicht auf die technologisch oder betrieblich bedingte „Auslastung“ (oft als Betriebszeit, Anlagen-Auslastungsfaktor oder „plant load factor PLF“ bezeichnet).

Mit anderen Worten: Wenn die Technik versagt oder ein Kraftwerk absichtlich abgeschaltet wird, verringert sich zwar die Auslastung, nicht aber der natürliche Kapazitätsfaktor.

Keiner dieser Begriffe hat etwas mit dem **Wirkungsgrad** zu tun, der das Verhältnis zwischen der **Nutzleistung** einer Energie-Umwandlungsmaschine (oder Fabrik oder Anlage) und dem Energieeinsatz misst. So ergibt sich z. B. der prozentuale Anteil des Stromes, den ein Gaskraftwerk aus dem einströmenden Gas „erzeugt“, oder der prozentuale Anteil des intermittierenden Stromes, den ein Solarpaneel aus der einfallenden Sonne „erzeugt“. Sowohl Gas als auch Sonnenschein sind Primärenergie; weitere Einzelheiten finden Sie in meinem jüngsten Blogbeitrag [in deutscher Übersetzung hier]

Nachdem wir nun ein besseres Verständnis der Terminologie haben, können wir fortfahren...

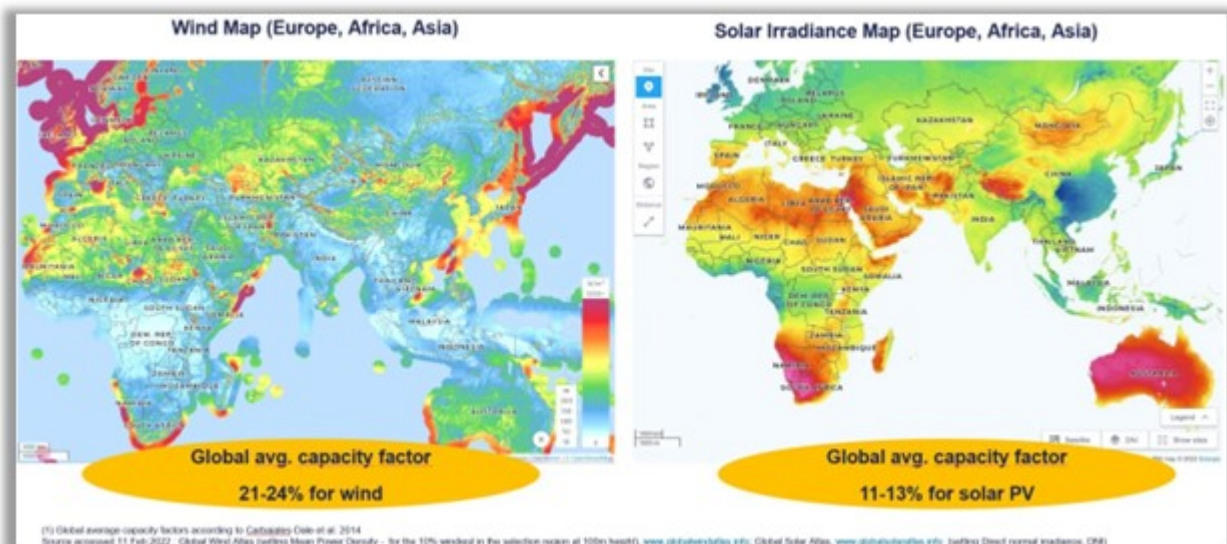


Abbildung 2: Globale durchschnittliche Kapazitätsfaktoren nach Carbajales-Dale et al. 2014 **Quelle:** Zugriff am 11. Februar 2022: Global Wind Atlas (Einstellung Mean Power Density – für die 10% der windstärksten Stellen in der Auswahlregion in 100m Höhe), www.globalwindatlas.info; Global Solar Atlas, www.globalsolaratlas.info (Einstellung Direct normal irradiance, DNI)

2. Zahlen und Fakten

Der weltweite Durchschnitt des natürlichen Kapazitätsfaktors der Solarenergie (nCF) liegt zwischen ~11-13 %. Selbst an den besten Standorten der Welt, nämlich in Kalifornien, Australien, Südafrika und der Sahara, übersteigt er nur selten 25 %. (Links im Abschnitt unten)

Betrachtet man den weltweiten Durchschnitt der natürlichen Kapazitätsfaktoren der Windenergie (nCF), so liegt dieser bei etwa 21-24 %, wobei die besten Offshore-Standorte in Nordeuropa selten über 40 % erreichen. In den meisten Teilen Asiens und Afrikas gibt es kaum nutzbaren Wind, und der durchschnittliche nCF liegt unter 15%, mit Ausnahme bestimmter Gebiete an den Küsten Südafrikas und Vietnams. (Links im Abschnitt unten)

Die natürlichen Kapazitätsfaktoren in Europa sind für Windenergie tendenziell höher als für Solarenergie. Obwohl die Windkraftanlagen in Nordeuropa einen Durchschnittswert von über 30 % erreichen könnten (wobei dieser Wert bei teureren Offshore-Windparks höher und bei Onshore-Windparks niedriger ist), sinkt dieser Durchschnittswert in Indien drastisch auf weniger als 15 % und in Indonesien auf weniger als 8 %.

Im Durchschnitt, wobei die Betonung auf Durchschnitt liegt, erreichen die jährlichen PV-Kapazitätsfaktoren in Deutschland ~10-11%, in Spanien ~17%, in Kalifornien ~25% und könnten in Indien 14-19% erreichen, liegen aber in den besiedelten Gebieten Indonesiens immer noch unter 15%.

Abbildung 3 unten zeigt einen zweiwöchigen Zeitraum im Mai 2022 (als ich das Kapitel unseres [Buches](#) „**Unbequeme Wahrheiten... über Strom und die Energie Der Zukunft**“ über Kapazitätsfaktoren schrieb), in dem der durchschnittliche Nettolastfaktor nur ~5% für ALLE deutschen Windanlagen (On- und Offshore) erreichte. Aufgrund der Einspeisepriorität in Deutschland für Wind entspricht der Nettolastfaktor praktisch dem natürlich Kapazitätsfaktor (Auslastung ist praktisch 100%)

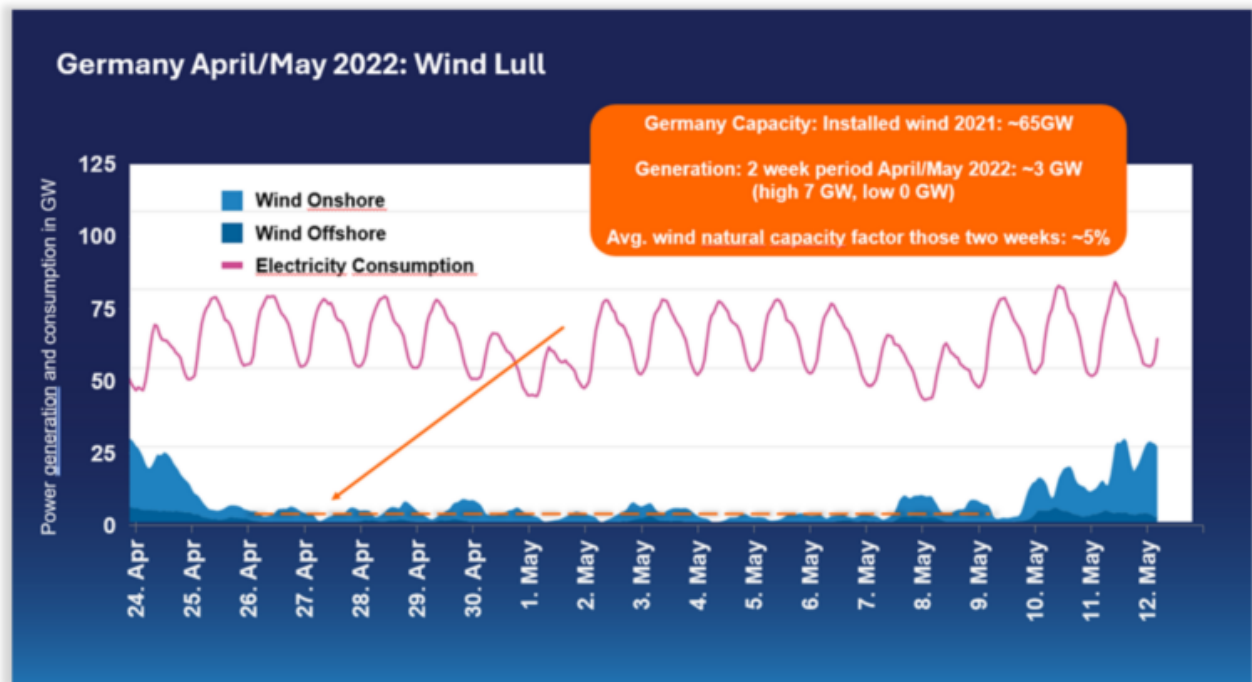


Abbildung 3: Deutschland April/Mai 2022: Windflaute. Daten vom April und Mai 2022. Daten: [Agora](#)

3. „Natürlicher Kapazitätsfaktor“ und Auslastung erklärt

Wie bereits erwähnt, ergibt sich der „natürliche Kapazitätsfaktor“ aus dem **Standort der PV-Anlage** und nicht aus der Anlage selbst. Daher sind selbst hochmoderne PV-Anlagen immer noch mit den Grenzen der Wetterbedingungen und somit dem natürlichen Kapazitätsfaktors konfrontiert, der im Jahresdurchschnitt bei 10-25 % liegt, wobei andere Verluste aus der Aufbereitung, der Übertragung, dem Ausgleich oder der Speicherung stark intermittierender Stromquellen nicht berücksichtigt werden. (Schernikau und Smith 2021).

Wenn ich in der Presse lese, dass Kohle oder Gas im Durchschnitt einen „Kapazitätsfaktor“ von 60 % oder weniger haben, und dies mit einem „Kapazitätsfaktor“ von 30 % für Windkraftanlagen vergleiche, kann ich nicht umhin, die politische Motivation hinter dieser irreführenden oder sogar völlig falschen Aussage zu hinterfragen.

Ein solcher „Kapazitätsfaktor“ für Kohle oder Gas ist nicht ihr **natürlicher Kapazitätsfaktor**, sondern verdeutlicht vielmehr ihre geringe **Auslastung**, die mit dem zunehmenden Ausbau von Wind- und Solaranlage noch weiter sinkt und zum Anstieg der Stromsystemkosten beiträgt. Diese geringe Auslastung trägt zu dem niedrigen durchschnittlichen **Netto-Lastfaktor** eines Kohle- oder Gaskraftwerks bei, der dann nur 60 % oder weniger betragen kann.

Wie man nun sieht, sollte und kann die Auslastung nicht mit den „natürlichen Kapazitätsfaktoren“ verglichen werden, es handelt sich um

zwei sehr unterschiedliche Messgrößen.

Konventionelle Kraftwerke haben natürliche Kapazitätsfaktoren von nahezu 100 %, aber ihre betriebliche und technologische Auslastung liegt oft deutlich unter 90 %, was oft, aber nicht nur, auf den Vorrang oder der Netzpriorität von Wind- und Sonnenenergie im System zurückzuführen ist.

Der andere Grund ist einfach die Reaktion auf Nachfrageschwankungen, die einsatzfähige Kohle- und Gaskraftwerke ausgleichen können. Bei konventionellen Kraftwerken ist der Nettolastfaktor aufgrund ihres hohen natürlichen Kapazitätsfaktors nur geringfügig niedriger als die Auslastung.

Im Gegensatz zu konventionellem Strom liegt die Auslastung von Wind- und Solarkraftwerken oft nahe bei 100 %, wobei ihr Nettolastfaktor nur geringfügig niedriger ist als ihr natürlicher Kapazitätsfaktor. Die hohe Auslastung ist auch, aber nicht nur, auf den Netzvorrang zurückzuführen, der in den meisten Netzsystemen für intermittierende Wind- und Solarenergie gewährt wird, und natürlich auf die Grenzkosten von nahezu Null.

- *natürlicher Kapazitätsfaktor (nCF) x Auslastung = Nettolastfaktor*

Wie in diesem kürzlich erschienenen [Artikel](#) erörtert [in deutscher Übersetzung [hier](#)], bedeuten die niedrigen MARGINALEN Kosten von Wind- und Solarenergie nicht gleichzeitig niedrige GESAMTSYSTEMKOSTEN, die für ein Land von Bedeutung sind.

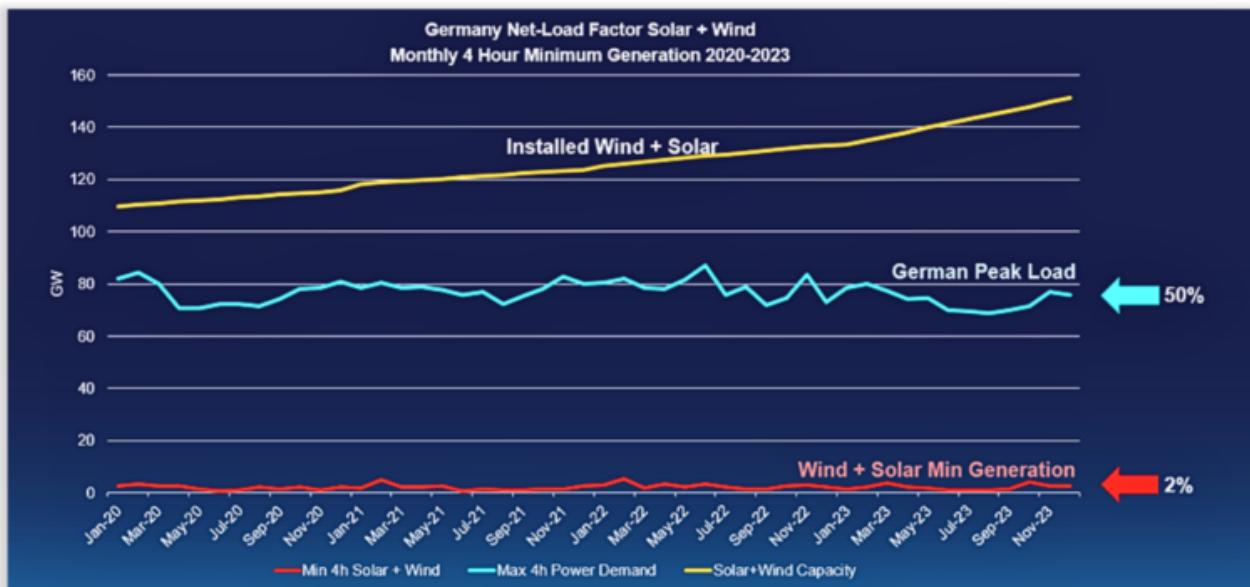


Abbildung 4: Nettolastfaktor Wind + Solar für den ersten monatlichen 4-Stunden-Zeitraum in Deutschland 2000-2024. Quelle: Lars Schernikau, basierend auf Agora

4. Der Standort ist alles ... aber ebenfalls begrenzt

Natürlich kann der „natürliche Kapazitätsfaktor“ von Wind- und Solarenergie (einschließlich Wasserkraft aufgrund natürlicher Flussläufe, die in Ländern wie Vietnam oder Indien durch hohe Schwankungen der Wasserkraft gekennzeichnet sind) weder genau vorhergesagt noch für einen bestimmten Zeitraum garantiert werden. Der „natürliche Kapazitätsfaktor“ kann nur auf Jahresbasis geschätzt werden, aber selbst dann schwankt er aufgrund seiner sehr unbeständigen Natur und des Wetters stark (siehe Europa 2021 und 2022). Wir haben gesehen, dass Wind- und Solarenergie selbst an Spitzenstandorten Tage und Wochen lang nahezu 0 % erreicht haben (Abbildungen 2 und 3).

Daher sind die „natürlichen Kapazitätsfaktoren“ weltweit ein direktes Ergebnis des Standorts der Wind- oder Solaranlage; sie hängen in keiner Weise von der eingesetzten Technologie ab und können von ihr nicht beeinflusst werden.

Der sehr wichtige Punkt, den ich hier anführen möchte ist, dass... ***keine technologischen Fortschritte die natürliche Verfügbarkeit von Wind, Sonne oder Flussläufen und somit das Wetter verändern/verbessern beeinflussen können. Damit kann auch keine Technologie den natürlichen Kapazitätsfaktor einer bestimmten Anlage verändern.*** Die Technologie KANN und WIRD verbessern, wie viel nutzbare Elektrizität aus dem natürlichen Eingangsprodukt (Wind, Sonne, Fluss, Gas, Kohle, Uran usw.) gewonnen werden kann, was als Wirkungsgrad bezeichnet wird und dessen Grenzen wir weiter unten erörtern werden.

Da wir die besten Standorte für Wind- und Solaranlagen nahe von bevölkerten Gebieten bereits besetzt haben, könnte man logischerweise erwarten, dass die durchschnittlichen „natürlichen Kapazitätsfaktoren“ im Laufe der Zeit sinken werden, was im Widerspruch zu den Net-Zero-Plänen steht, die oft davon ausgehen, dass die durchschnittlichen globalen natürlichen Kapazitätsfaktoren steigen werden (siehe IEA, McKinsey, BCG, IRENA und viele andere)

1. Bei einem Photovoltaik-Park hängt der natürliche Kapazitätsfaktor nCF vollständig von der Intensität und der Dauer der Sonneneinstrahlung ab, die von der Jahreszeit und der Bewölkung beeinflusst wird, von Tag und Nacht sowie von der Aufrechterhaltung der Oberflächentransparenz des PV-Panels, z. B. Staub, Wüstensand oder Schnee im Winter.

2. Die natürlichen Kapazitätsfaktoren von Windparks hängen von der Verteilung der Windgeschwindigkeit am Standort und der Sättigungsgeschwindigkeit der Windturbine ab. Der nCF einer Windkraftanlage wird durch die Anzahl der Stunden pro Jahr bestimmt, in denen der Windpark bei oder oberhalb der Sättigungswindgeschwindigkeit arbeitet (mehr bei Elsevier's SSRN [„An Introduction to Wind Energy“](#) by Smith und Schernikau 2022). Wenn die Windsättigungsgeschwindigkeit niedrig angesetzt ist, z.B. 4-5 m/s, produziert der Windpark wenig

Energie, selbst wenn die Kapazitätsfaktoren hoch sind. Üblicherweise liegen die Windsättigungsgeschwindigkeiten bei 12-15 m/s.

Jetzt wird klar, warum die installierte Kapazität für Wind- und Solarenergie viel größer sein muss als für regelbare Energie wie Kernkraft, Kohle, Gas oder Wasser. Dieser beträchtliche Anstieg der Energieerzeugungskapazität zur Erzeugung der gleichen aber unvorhersehbaren Energiemenge ist mit einem wesentlich höheren Rohstoff- und Energieeinsatzfaktor für variable „erneuerbare“ Energie gekoppelt, der durch so genannte Brennstoffeinsparungen ausgeglichen werden muss.

Abbildung 5 veranschaulicht ein gutes Beispiel: In Deutschland hat sich die gesamte installierte Stromkapazität in den letzten 20 Jahren mehr als verdoppelt, was im Wesentlichen auf Wind- und Solarenergie zurückzuführen ist. Die installierte Wind- und Solarkapazität beträgt jetzt über 150 GW, was allein das Doppelte des Spitzenstrombedarfs in Deutschland von etwa 80 GW ist. Die in Deutschland installierte konventionelle Stromerzeugungskapazität, bestehend aus Kohle, Gas, früherer Kernkraft, Wasserkraft und Biomasse, deckt den Spitzenstrombedarf immer noch kaum ab. Selbst mit all diesen zusätzlichen Kapazitäten in Deutschland werden Wind und Sonne im Jahr 2022 nur etwas mehr als 30 % der gesamten Stromerzeugung und nur etwa 6 % des gesamten Energieverbrauchs ausmachen.

Der niedrige natürliche Kapazitätsfaktor von Wind- und Solaranlagen ist zweifelsohne zum Teil auf deren niedrige Netto-Energieeffizienz zurückzuführen.

(Link in section below – Source Schernikau et al 2022: Full Cost of Electricity 'FCOE' and Energy Returns 'eROI.' Journal of Management and Sustainability 12, no. 1 (May 2022): p96)

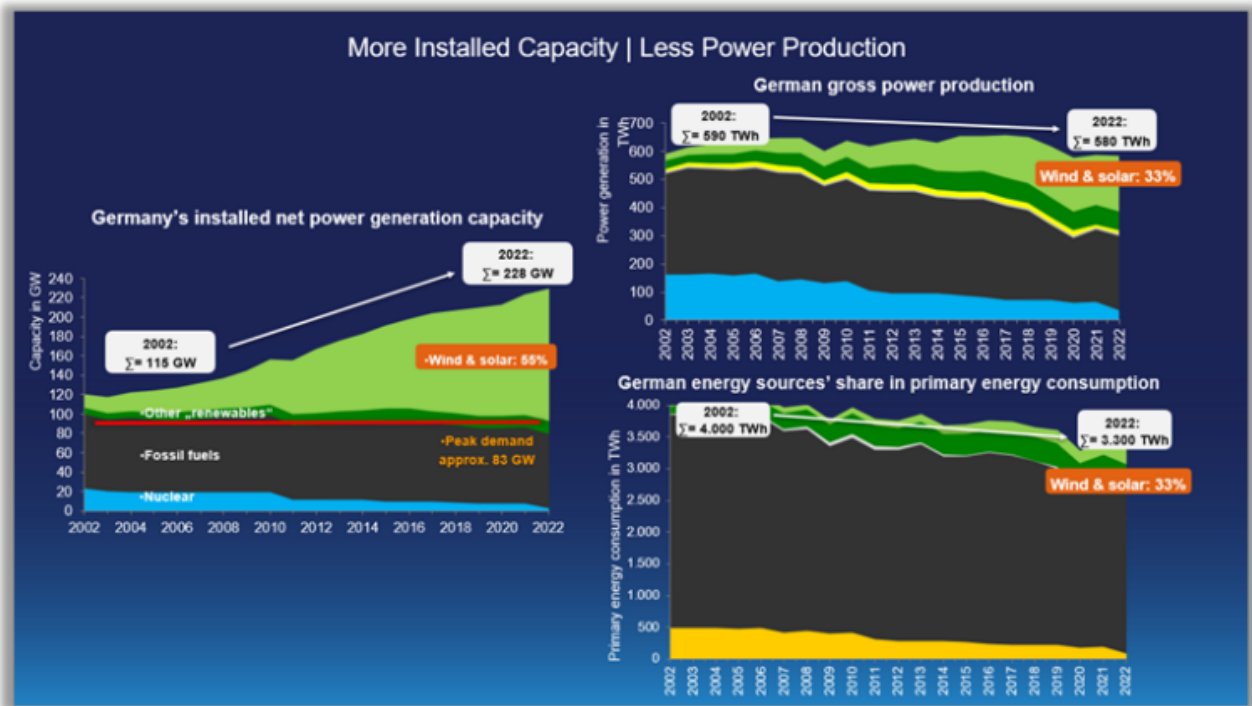


Abbildung 5: Installierte Leistung in Deutschland, Stromerzeugung, Primärenergie. Quellen: Schernikau auf Basis von Fraunhofer, Agora, AG Energiebilanzen. Siehe auch www.unpopular-truth.com/graphs.

5. Wirkungsgrad

Was also ist Wirkungsgrad? Der Wirkungsgrad misst das Verhältnis zwischen der generierten Nutzleistung einer „Energieumwandlungsmaschine“ und dem Primärenergieeinsatz, und zwar unabhängig vom natürlichen Kapazitätsfaktor oder der Auslastung einer solchen Anlage oder Ausrüstung. Lesen Sie auch hier mehr über das Verständnis oder Unverständnis über Primärenergie.

In Abbildung 6 finden Sie eine Zusammenfassung der Wirkungsgrade von Wind- und Solarkraftwerken und der Gesetze, denen sie folgen. Der Wirkungsgrad eines Solar- oder Gaskraftwerks misst im Wesentlichen, wie viel nutzbare Elektrizität das Kraftwerk aus der in der Sonne oder dem Gas enthaltenen Primärenergie „herausholen“ kann, mit der es „gefüttert“ wird.

Es ist richtig, dass der Primärenergieträger „Sonne“ erneuerbar ist, im Gegensatz zum Primärenergieträger „Gas“, der nicht erneuerbar ist. Aber **die Anlagen, die zur Umwandlung dieses Primärenergieträgers (erneuerbar oder nicht) erforderlich sind, sind niemals „erneuerbar“**. Am wichtigsten ist, dass die Energiedichte und die Unterbrechung der Energieversorgung die Größe und die Komplexität solcher „Anlagen zur Sammlung und Umwandlung von Primärenergie“ bestimmen. Für weitere Einzelheiten siehe hier.

Laws of Physics Limit Further Improvements for Wind and Solar

- Wind → Betz Limit
 - Max 60% of kinetic energy in air that a blade can capture for conversion to electricity
 - Modern turbines do not exceed 45% conversion to electricity
 - Turbines only reach 30-45% when brand new, due to continuous degradation each year
- Photovoltaic (PV) → Shockley-Queisser Limit for monocrystalline silicon
 - Max 33% of incoming photons can be converted into electrons in silicon photovoltaic
 - State-of-the-art single-layer PV achieve over 26% conversion to electricity
 - New non-silicon options will have similar boundaries and are far from economical
 - Multi-layer PVs have reached about 45% conversion, none are as durable as silicon
- Space requirements, material input, and recycling needs of wind and solar are underestimated
 - Wind: cement, steel, balsa wood, fiber glass (for airfoils), energy and material input
 - Solar: Silicon derived from silicon oxides/quartz, silver, steel, aluminum, energy input



While we have seen large improvements in efficiencies and costs in past decade, further 10-fold improvements are impossible as we reach physical limits

Abbildung 6: Physikalische Gesetze begrenzen technologische Verbesserungen bei Wind und Sonne. Quelle: Schernikau und Smith Forschung und Analyse

6. Zusammenfassung

Das Verständnis der Feinheiten von Begriffen wie natürlicher Kapazitätsfaktor, Auslastung, Lastfaktor und Wirkungsgrad ist im Bereich der Energie- und Stromerzeugung von entscheidender Bedeutung, insbesondere angesichts der zunehmenden Integration von Wind- und Solarenergiequellen. Es kann sein, dass andere Begriffe für die gleichen Konzepte verwendet werden, das ist aber irrelevant, solange man die Unterschiede verinnerlicht hat. Die oft von Medien und Politikern bestehende oder gestiftete Verwirrung macht den Bedarf an Klarheit noch deutlicher.

Es ist von entscheidender Bedeutung, zwischen dem natürlichen Kapazitätsfaktor (nCF), der durch die natürlichen Bedingungen am Standort des Kraftwerks bestimmt wird, und der Auslastung, die die betriebliche Nutzung während des Jahres widerspiegelt, zu unterscheiden. Diese Unterscheidungen sind wichtige Teile des Puzzles der „erneuerbaren“ Energien und helfen uns, die Herausforderungen und Grenzen zu verstehen, die mit der Nutzung von Energie aus variablen Quellen wie Wind und Sonne im Vergleich zu konventionellen, planbaren Stromsystemen verbunden sind.

Technologische Fortschritte können zwar die Effizienz der Umwandlung natürlicher Primärenergieressourcen wie Wind, Sonne, Kohle, Gas, Uran, Wasserströme usw. in nutzbare Elektrizität verbessern, sie können jedoch nichts an der grundsätzlichen Verfügbarkeit dieser Ressourcen ändern.

Die Variabilität der Wind- und Solarenergie, die durch den Standort und die natürlichen Bedingungen beeinflusst wird, macht deutlich, dass im Vergleich zu regelbaren oder berechenbareren Energiequellen wie Kohle, Gas oder Kernkraft größere installierte Kapazitäten erforderlich sind. Bei der weiteren Entwicklung unserer Energiesysteme wird die Berücksichtigung dieser Unterschiede von entscheidender Bedeutung sein, um realistische und effektive Strategien für erneuerbare Energien für die Zukunft zu entwickeln.

Ich hoffe, dass wir nun alle den Einfluss der Natur auf die Stromerzeugung aus Sonne und Wind besser verstehen.

Nichts von dem, was ich schreibe, schließt aus oder entbindet uns davon, alles in unserer Macht Stehende zu tun, um die ökologische und wirtschaftliche Effizienz unserer bestehenden Energiesysteme weiter zu verbessern.

Links und Quellen

- [Global Solar Atlas](#)
- [Global Wind Atlas](#)
- Noland et al 2022: Spatial Energy Density of Large-Scale Electricity Generation from Power Sources Worldwide. Scientific Reports 12, no. 1 (December 2022): 21280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25341-9>.
- Carbajales et al 2014: Can We Afford Storage? A Dynamic Net Energy Analysis of Renewable Electricity Generation Supported by Energy Storage. Energy & Environmental Science 7, no. 5 (April 2014): 1538–44. <https://doi.org/10.1039/C3EE42125B>.
- Schernikau et al 2022: Full Cost of Electricity 'FCOE' and Energy Returns 'eROI.' Journal of Management and Sustainability 12, no. 1 (May 2022): p96. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4000800>.

Link des ursprünglichen Beitrags:

<https://unpopular-truth.com/2024/07/05/natures-influence-on-solar-and-wind-power-generation/> Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE

Anmerkung: Diese Übersetzung ist vom Autor begutachtet worden.