

Die Grenzen der Optimierung von Windrädern

Der physikalisch maximal mögliche (theoretische) Wirkungsgrad von Windturbinen beträgt 0,59. ⁽²⁾ Da sich dieser Wert auf eine theoretische ungestörte Aerodynamik bei laminarer Strömung bezieht, kann er praktisch nicht erreicht werden. Die *Siemens SWT-3.15-142* 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 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 Steigerung des Wirkungsgrades ist bei modernen WEA bereits ausgeschöpft. Bei Nenn-Windgeschwindigkeit der SWT-3.15-142 von 11 m/s beträgt der Wirkungsgrad jedoch nur 0,25. Dies mag zunächst unverständlich erscheinen, denn die WEA hat beim höheren Dargebot an Leistungsdichte des Windes von 815 W/m² 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/m².

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 hat. 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 Ingenieurtechnik hat bzgl. der Leistungsdichte ausgeschöpft, was es auszuschöpfen gab. Der einzige verbleibende Freiheitsgrad zur Optimierung ist die Rotorfläche, was eine größere Nabenhöhe voraussetzt. Ein Beispiel mag die Problematik verdeutlichen. Die Rotorfläche verdoppelt sich, wenn man statt einer WEA mit der Rotorfläche A zwei WEA jeweils mit der Rotorfläche A aufstellt. Dadurch verdoppelt sich auch die Gesamtleistung. An der Leistungs-dichte der WEA pro Quadratmeter Rotorfläche ändert sich jedoch nichts, denn diese wird allein von der dargebotenen Leistungsdichte der Luftsäule des Windes bestimmt. Nun werde die Nabenhöhe der WEA erhöht, so dass eine WEA ebenfalls mit der doppelten Rotorfläche entsteht. Auch dies ändert zunächst nichts an der Leistungsdichte der WEA. Man mag einwenden, dass ein größeres Windrad aus dem stärkeren Wind in größeren Höhen schöpfen kann. Dies ist zwar für eine einzelne WEA richtig, jedoch nicht zu Ende gedacht.

Windräder bremsen den Wind

Da eine WEA dem anströmenden Wind einen Teil von dessen kinetischer Energie entzieht, und diese in elektrische Energie wandelt, wird folglich die Windgeschwindigkeit in Lee der WEA verringert. Die anströmende Luft bringt auf den Rotor mit der Fläche A eine Leistung auf. (Formel-2) Die WEA entnimmt dem Wind die effektive Leistung $P_{eff} = c_p P_w$ (mit c_p - Wirkungsgrad). Die Entnahme von Wind-Leistung (P_{eff}) verringert die Strömungs-geschwindigkeit der Luft von V_1 auf V_2 entsprechend der Formel. ⁽²⁾

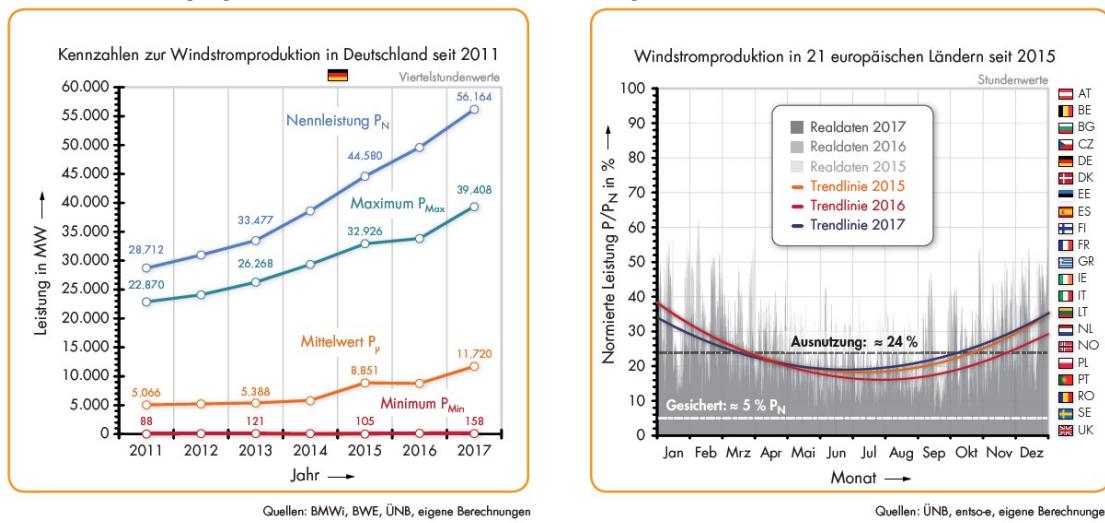
$$P_{\text{eff}} = P_1 - P_2 = \frac{\Delta V \rho}{2 \Delta t} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A}{4} (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)$$

Auf eine numerische Berechnung des Geschwindigkeits-Verlustes ($\Delta V = V_1 - V_2$) bezüglich einer bestimmten WEA und bestimmter Windverhältnisse, kann verzichtet werden, da das Prinzip der Verringerung der Windgeschwindigkeit hinreichend erklärt ist. Dies bestätigt auch die Fachliteratur unter dem Titel „Turbinen schwächen die Windenergie“ und gibt für die maximal erreichbare mittlere Leistungsdichte pro Quadratmeter Landschaftsfläche einen Wert von $1,1 \text{ W/m}^2$ an.⁽⁴⁾ Dieser Wert wird vom selben Autor in einer späteren Studie auf $0,5 \text{ W/m}^2$ Landschaftsfläche nach unten korrigiert.⁽⁵⁾ Der Grund ist folgender:

Vom Windrad zum Windpark

Bei der Planung zum Windkraft-Ausbau wird gern vom einzelnen Windrad ausgegangen und so getan, als ob man dies für viele Windräder linear nach oben skalieren könnte. Diese Annahme ist falsch. Die u.g. Grafik zeigt eine Zunahme der installierten Nennleistung von 28.712 MW (im Jahr 2011) auf 56.166 MW (im Jahr 2017). Dies ist eine Zunahme um 27.454 MW. Analog nahm die mittlere Leistung von 5.066 MW auf 11.720 MW zu, was nur einer Zunahme von 6.654 MW entspricht. Dies heißt, ein Zugewinn pro 1 MW mittlerer Leistung erforderte einem Zubau an Nennleistung von 4.125 MW. Mit anderen Worten, der Zugewinn an mittlerer Leistung erforderte das 4-fache an Neuinstallationen. Und mit dem weiterem Zubau wird dieses Verhältnis immer schlechter. Denn der Vergleich der beiden Kurven (**blau Nennleistung**) und (**orange mittlere Leistung**) zeigt, dass sich die Schere immer weiter öffnet und ein weiterer Zubau an Windkraft immer weniger bringt. Weiterhin wird offenbar, dass die **gesicherte Leistung (rote Kurve)** nahe Null ist und nie mehr als etwa 150 MW betrug, was ca. 0,3% der Nennleistung entspricht. Für ganz Europa beträgt die gesicherte Leistung nur 5% der Nennleistung. **Fazit:** Mit Windkraft ist eine sichere Stromversorgung nicht möglich!

Quelle: VGB-Power Tech, Verband der Kraftwerksbetreiber „Windenergie in Deutschland und Europa Status quo, Potenziale und Herausforderungen in der Grundversorgung mit Elektrizität Teil 1, S. 8-9“: Entwicklungen in Deutschland seit 2010, Thomas Linnemann, Guido S. Vallana



VGB

SEITE 8 - 9

Die Grafik zeigt, dass sich Windparks bei weiterem Ausbau zunehmend gegenseitig beeinflussen. Dies wurde auch in der Literatur, die auf Messungen in Windparks in den USA beruht, beschrieben.⁽⁴⁾ In einer weiteren Studie wurde vom selben Autor unter dem Titel „Neue Studie Aus Jena: Das Potenzial Und Die Grenzen Der Windkraft“ festgestellt, dass sich bei großen Windparks die Leistungsdichte der Windkraft auf unglaublich geringe $0,5 \text{ W/m}^2$ Landschaftsfläche verringert.⁽⁵⁾ Der Windkraft-Ausbau kannibalisiert sich selbst und hinterlässt nichts als eine Kulturlandschaft, die in ein einziges riesiges Elektrizitätswerk umgewandelt wird. Wobei die gesicherte Leistung im Bereich der Bedeutungslosigkeit liegt. Warum ist dies so?

Kannibalisierung durch Windkraft

Dem Wind wird durch eine WEA nicht nur kinetische Energie entzogen und deshalb die Windgeschwindigkeit für Windparks in Lee verringert, sondern die Luft wird auch großflächig und kilometerweit verwirbelt, s. Foto-⁽⁶⁾.

Je höher die Windräder sind und je größer ihre Rotorflächen, umso gravierender ist die Energieentnahme, umso nachhaltiger sind die Verwirbelungen und um so größer die Höhen in denen all dies stattfindet. Man stelle sich vor, die Verwirbelungen reichen bis zur Untergrenze tiefhängender Wolken. Dann würden sie durch Erzeugung von Turbulenzen und durch die Entnahme von Energie noch stärker zu „Wetter-Machern“, die sie bereits sind.

Wie der Tragflügel eines Flugzeuges braucht jedes Rotorblatt einer WEA eine laminare Strömung, denn deren Auftrieb bzw. Vortrieb geschieht durch die Verdichtung laminar strömender Luft an der Oberseite des Tragflügels. Was passiert, wenn ein Flugzeug in Turbulenzen gerät, ist bekannt, im schlimmsten Falle gibt es Strömungsabriß. Eine WEA kann dadurch zwar weder an Höhe verlieren noch abstürzen, doch verliert sie an Leistung. Dies senkt die „Stromernte“, so dass die Leistungsdichte bei großflächigem Windkraft-ausbau von ehemals prognostizierten maximal $1,1 \text{ W/m}^2$ auf nur noch ca. $0,5 \text{ W/m}^2$ (Watt pro Quadratmeter Bodenfläche) sinkt.^{(4), (5)} Dies ist ein unvorstellbar kleiner Wert. Diese Halbierung der Leistungsdichte verdoppelt den Flächenbedarf in der Landschaft.

Die bittere Erkenntnis – Windräder nehmen sich gegenseitig den Wind weg

Der physikalisch bedingte Mindestabstand von WEA in Windrichtung beträgt das Achtfache des Rotordurchmessers, bei der SWT-3.15-142 mit 142 m Rotordurchmesser wären dies 1.136 m.⁽²⁾ Wobei dies für WEA innerhalb eines Windparks gilt. Windräder größer zu bauen, mag eine technologische Herausforderung sein, physikalisch ändert sich dadurch fast nichts, da sich die Leistungsdichte der anströmenden Luftsäule pro Quadratmeter Rotorfläche nicht ändert. Mit anderen Worten, zwei kleine Windräder haben zunächst die gleiche Strom-erzeugung, wie ein großes mit doppelter Rotorfläche, gleichen Wirkungsgrad und Windgeschwindigkeit vorausgesetzt. Zwar ist es richtig, dass eine größere WEA auch aus den höheren Windgeschwindigkeiten in größeren Höhen schöpfen kann, jedoch ist dies nur die halbe Wahrheit. Denn die Pläne zum Ausbau der Windkraft sehen nicht eine WEA vor, sondern viele WEA und viele Windparks. Und innerhalb eines Windparks bedingen größere Windräder auch größere Abstände. Was man an installierbarer Leistung pro Quadrat-kilometer Landschaftsfläche durch größere Windräder gewinnt, verliert man durch den größeren Abstand der Windräder. Die Veröffentlichung eines Max-Planck-Instituts „Turbinen schwächen die Windenergie“ kommt zu dem Schluß:

„Die Effekte führen dazu, dass Wind-turbinen in großen Windparks erheblich weniger Energie erzeugen können, als eine isoliert stehende Turbine“.⁽⁴⁾

Die Leistungsdichte sei deshalb in großen Windparks auf $1,1 \text{ W/m}^2$ limitiert, dies entspricht $1,1 \text{ MW/km}^2$ Landschaftsfläche. Der MDR berichtet vom gleichen Institut und gleichen Autor unter dem Titel: „Neue Studie aus Jena: Das Potenzial und die Grenzen der Windkraft“.⁽⁵⁾

Zitat: „Eine Kantenlänge von 100 Kilometern sollten diese (Windparks) nicht überschreiten. Windparks in diesem Ausmaß können nämlich tatsächlich nicht mehr als 0,5 Watt elektrische Energie pro Quadratmeter erzeugen. Kleinere Anlagen dagegen können eine höhere Ausbeute pro Fläche erzielen. Grund dafür: Sie klauen sich nicht gegenseitig den Wind, sondern sind in der Lage, die dem Wind entzogene Energie durch die aus höheren Luftschichten zu ersetzen.“

Ermittelt wurden die Daten in großen Windparks in den USA im Bundesstaat Kansas. In der Prärie sind Windparks mit riesigen Dimensionen möglich. Und selbst dort, wo der Wind ungebremst weht, ist die Leistungsdichte auf $0,5 \text{ MW}/\text{km}^2$ Landschaft bei Windparks von 100 km Kantenlänge limitiert. Der MDR schreibt dazu:

„Das Ergebnis: 0,5 Watt pro Quadratmeter. Das klingt wenig. Bezogen auf die Gesamtfläche ist es aber eine ganze Menge Energie, nämlich 250 Terrawatt. Das ist ein Mehrfaches der ungefähr 30 Terrawatt, die für Mitte des Jahrhunderts an totalem Energiebedarf – also nicht nur Strom – der Menschheit prognostiziert werden.“

Die vom MDR verkündete Zahl von 250 TW bezieht sich bei einer Leistungsdichte der Windkraft von $0,5 \text{ MW}/\text{km}^2$ auf die gesamte Erdoberfläche von 510 Mio. Quadratkilometer, die zu ca. 71% von Meeren bedeckt ist. Nachdem MDR-Wissen noch einen Professor befragt hat, kommt man zu dem Schluß „*Das klingt doch vielversprechend und macht Mut für die Energiewende*“. Dazu sei festgestellt:

- größere Windräder bremsen den Wind in größeren Höhen und nehmen WEA im gleichen Windpark und anderen Windparks in Lee noch mehr Wind weg.
- Größere Windräder bedeuten, dass die abgebremste Windgeschwindigkeit nur durch immer höhere Luftschichten ausgeglichen werden kann, die immer näher an die Wolkengrenze reichen. Dadurch werden immer größere Windräder immer mehr zu Wettermachern und beeinflussen damit großflächig das (Mikro)-Klima.
- Windparks (selbst in der windreichen Prärie von Kansas) sollten nicht mehr als 100 km Kantenlänge haben, ansonsten ist die Leistungsdichte auf $0,5 \text{ MW}/\text{km}^2$ limitiert.
- frühere Schätzungen des gleichen Max-Planck-Instituts gingen von $1,1 \text{ W}/\text{km}^2$ aus.

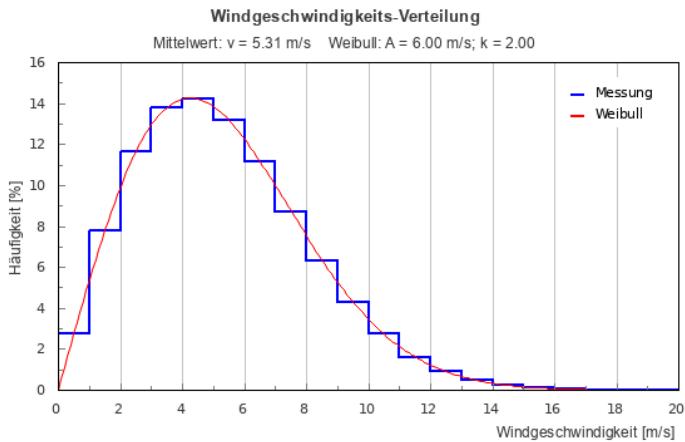
Aus den vom MDR veröffentlichten Daten sei eine grobe Abschätzung vorgenommen. Die Fläche von Deutschland beträgt 357.340 km^2 bei Ausdehnungen von max. $641 \text{ km} \times 879 \text{ km}$. Jedes Bundesland plant eigenständig zur Windkraft und baut oft bis an die Landesgrenze. In Deutschland sind geschlossene Windparks mit Kantenlängen von 100 km nicht möglich, jedoch erscheint es politisch nicht ausgeschlossen, jegliche Landschaft zwischen den Ortschaften mit Windparks füllen zu wollen? Dadurch würde, rein hypothetisch, ein Windpark von 357.340 km^2 in den Dimensionen von ca. $641 \text{ km} \times 879 \text{ km}$ entstehen. Ortschaften, Seen und Verkehrswege sind in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. Bei der vom MDR genannten Leistungsdichte von $0,5 \text{ W}/\text{km}^2$ wäre aus der Fläche von Deutschland eine max. mittlere Leistung von 178.670 MW zu generieren. Die aktuelle Last für Strom beträgt ca. 75.000 MW, wobei Strom ca. 20% der Primärenergie ausmacht. Der Bedarf an Primärenergie (hier mittlere Leistung) wäre also ca. 375.000 MW. Damit blieben noch ca. 196.330 MW, die in diesem flächendeckenden Wald aus Windrädern aus anderen Quellen gedeckt werden müssten. Doch hatte MDR-Wissen die gesamten Weltmeere beim propagierten „Mut für die Energiewende“ mit einbezogen. Es fällt schwer, hier den Realitätssinn zu erkennen?

Der Trugschluß mit der Nennleistung

Oft wird aus dem Begriff der Nenn-Leistung (3,15 MW bei der Siemens SWT-3.15-142) der Trugschluß gezogen, dies sei „die reale Leistung“ einer WEA, woraus weitere unzulässige Schlüsse folgen. So wird oft propagiert, ein Windpark versorge „bis zu XYZ“ Haushalte. Dass dies allein für Windgeschwindigkeiten ab Nenn-Windgeschwindigkeit, also etwa ab Windstärke sechs gilt, wird gern verschwiegen bzw. mit dem Terminus „bis zu“ verbrämt. Denn Windstärke 6 weht selten (s. Weibull-Verteilung). ⁽³⁾ Dadurch entsteht aber, nicht nur in der Bevölkerung, sondern auch bei Politikern und Planern ein unrealistisches Zerr-Bild, 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. ⁽⁷⁾ In der Physik führt ein Karussell sich gegenseitig verstärkender Impulse zu einer Resonanz-Katastrophe. In der Politik kann dies bei Trugschlüssen nicht anders sein.

Wie weit die Nenn-Leistung von WEA von der Realität entfernt ist, ergibt sich aus der Verteilungsfunktion der Windhäufigkeit (Weibull-Verteilung) ⁽³⁾

Grafik-2: Weibull-Verteilung der Windhäufigkeit



zeigt, dass die volatile Einspeisung (**grüne Kurve**) weitab vom Leistungsbedarf (**orange Kurve**) liegt.
Eine ausführliche Beschreibung erfolgt im betr. Fachartikel. ⁽⁸⁾

Grafik-3: Windhäufigkeit (**grün**) und Last (Stromverbrauch, **orange**)

Quelle: Sigismund Kobe, Rolf Schuster: Zusammenhang zwischen Residuallast und Börsenpreis beim Zubau volatiler erneuerbarer Energiequellen (8)

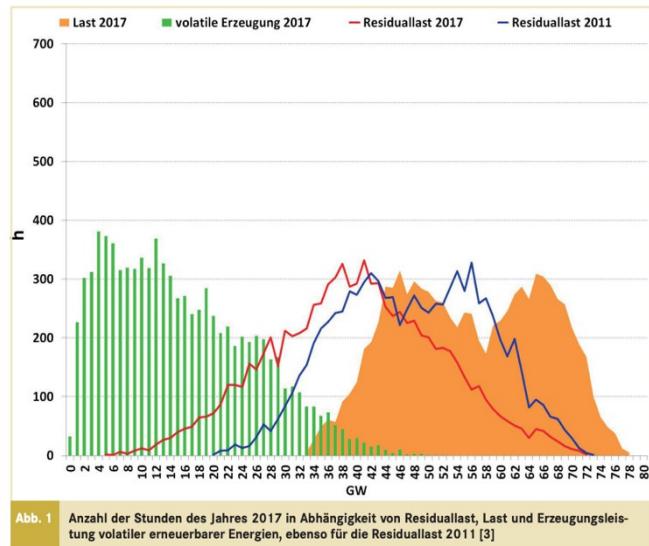


Abb. 1 Anzahl der Stunden des Jahres 2017 in Abhängigkeit von Residuallast, Last und Erzeugungsleistung volatiler erneuerbarer Energien, ebenso für die Residuallast 2011 [3]

Die Grafik zeigt eine typische Verteilung der **Windhäufigkeit im Binnenland**. Nenn-Windgeschwindigkeit > 11 m/s weht nur in ca. 5-6 % der Zeit (Summe aller Balken > 11 m/s). Nenn-Leistung bringt die WEA nur in dieser Zeit. In ca. 50 % der Zeit weht der Wind mit 5 - 8 m/s für welche die WEA optimiert ist. (Summe der betr. Balken). Häufig stehen die Rotoren unterhalb der Einschalt-geschwindigkeit von 4 m/s still (Summe aller Balken < 4 m/s). Stromerzeugung erfolgt nur oberhalb von 4 m/s.

Die Windhäufigkeit wird vom Windrad gem. Formel-1, dargestellt in Grafik-1 und numerisch berechnet in Tabelle-1 in elektrische Leistung umgesetzt. Grafik-3

Die Leistung des Strombedarfs (Last) pendelt zwischen 33 GW minimaler Last und 79 GW Spitzenlast. Die volatile Einspeisung (Wind und Solar) erfolgte von 0–52 GW. Die blaue Kurve ist die Residual-last in 2011, die rote Kurve die Residuallast in 2017. Dies ist die Last (Stromerzeugung) die durch konventionelle Kraftwerke erfolgen muss, wenn die Einspeisung von Wind- und Solarstrom nicht ausreicht. Die Spreizung der Residuallast (von min. zu max. Wert) nimmt zu, was bedeutet, dass der Gradient der Regelleistung zunimmt. Die konventionellen Kraftwerke fahren damit immer mehr auf Verschleiß. Und läuft alles in Richtung Blackout.

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>

(5) neue Studie Aus Jena: Das Potenzial Und Die Grenzen Der Windkraft

<https://www.mdr.de/wissen/energiewende-potenzial-und-grenzen-der-windkraft-100.html>

(6) Einfluss von Windrädern auf das Klima (s. Foto)

<https://ruhrkultour.de/beeinflussen-windraeder-das-klima/>

(7) Aktueller Stand von Windkraftanlagen, Repowering und Windvorranggebieten in Thüringen

https://parldok.thueringer-landtag.de/ParlDok/dokument/84610/aktueller_stand_von_windkraftanlagen_repowering_und_windvorrang_gebieten_in_thueringen.pdf

zu: parlamentarische Anfrage: Aktueller Stand Von Windkraftanlagen, Repowering Und Windvorranggebieten In Thüringen

<https://parldok.thueringer-landtag.de/ParlDok/vorgang/44627>

(8) Zusammenhang zwischen Residuallast und Börsenpreis beim Zubau volatiler erneuerbarer Energiequellen

https://tu-dresden.de/mn/physik/itp/das-institut/beschaeftigte/kobe/ressourcen/dateien/et_1878_60_Kobe_Schuster_BCDRneu_76-77.pdf?lang=de

(9) WINDENERGIE IN DEUTSCHLAND

<https://strom-report.de/windenergie/>

(10) Fakten zum Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal

<https://powerplants.vattenfall.com/de/goldisthal/>

(11) China Starts Up First Fourth-Generation

<https://www.powermag.com/china-starts-up-first-fourth-generation-nuclear-reactor/>

(12) Der Tag an dem der Strom knapp wurde

<https://zeitung.faz.net/faz/wirtschaft/2019-01-12/0ef138ca4a91f74600c9c37e8a8d9a2d/?GEPC=s9>

(13) California Faces Rolling Blackouts As Heat Wave Begins

<https://www.dailystorm.com/news/california-faces-rolling-blackouts-as-heat-wave-begins>

(14) Strom aus Atommüll: Schneller Reaktor BN-800 im kommerziellen Leistungsbetrieb

<https://nuklearia.de/2016/12/09/strom-aus-atommuell-schneller-reaktor.bn-800-im-kommerziellen-leistungsbetrieb/>

(15) Climatic Impacts of Wind Power

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511830446X>

(16) 1 Hiroshima Bomb Explosion (hbe) to all energy units

<https://www.justintools.com/unit-conversion/energy.php?k1=hiroshima-bomb-explosion>

(17) General Electric

<https://www.ge.com/power/steam/steam-power-plants/advanced-ultra-supercritical-usc-ausc>

(18) Jenaer Max-Planck-Forscher stoßen in Studien zu Windenergie auf Probleme

<https://www.thueringer-allgemeine.de/leben/wissenschaft/jenaer-max-planck-forscher-stoessen-in-studien-zu-windenergie-auf-probleme-id225152263.html>

(19) KIRCHHOFFsche Gesetze

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/komplexere-schaltkreise/grundwissen/kirchhoffsche-gesetze>