

# Energieeffizienz von Windkraftanlagen

Rainer A. Stawarz    17. September 2015    AG Energetik

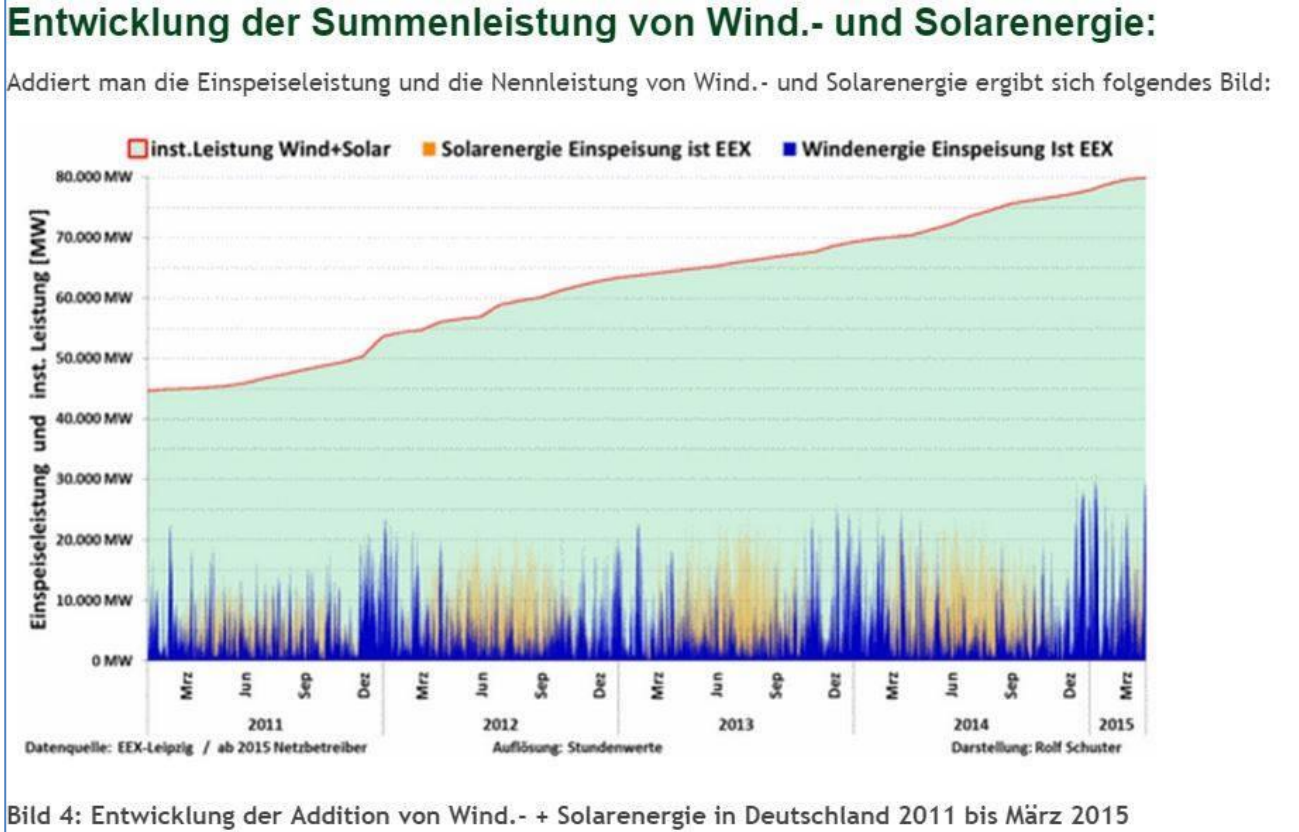
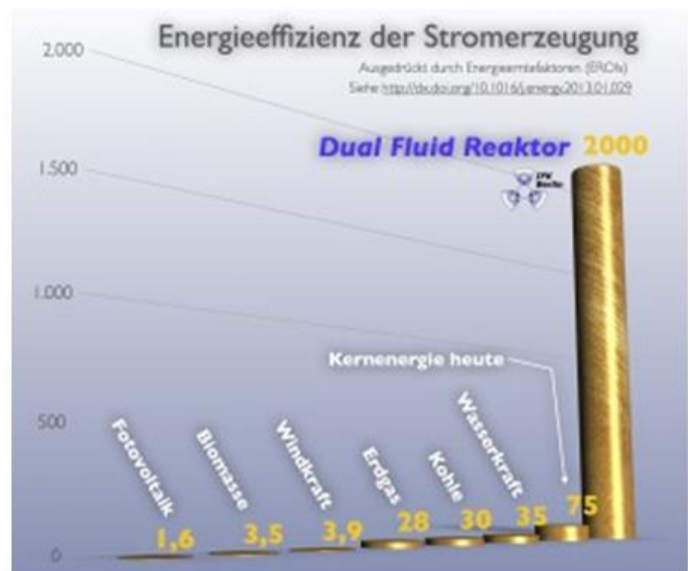


Bild 4: Entwicklung der Addition von Wind.- + Solarenergie in Deutschland 2011 bis März 2015  
Abb.1 Energie aus Sonne und Wind 2011-2015

Betrachtet man den Pressespiegel der letzten Jahre, so müsste die sog. Energiewende eine beispiellose Erfolgsstory sein. Beinahe tagtäglich wurde und wird immer noch von neuen Wind- und Solarparks berichtet, von Wasser- und Geothermie-Kraftwerken, die jeweils „Zigtausende“ von Haushalten mit Strom versorgen können. Wenn man all die „Zigtausende“ aus den letzten Jahren zusammenrechnet, so dürften die fossilen sowie die kerntechnischen Kraftwerke hierzulande mit Stromproduktion jedenfalls überhaupt nichts mehr zu tun haben.

Doch diese Euphorie bekommt spätestens dann einen kräftigen Dämpfer, wenn wir uns den Verlauf auf der Abb.1 anschauen. Die rote Kurve bestätigt zunächst die beobachtete beinahe Verdopplung 😊 der installierten Leistung bei „Wind und Sonne“, während der zackige Verlauf der tatsächlich eingespeisten Energie nur in homöopathischen Mengen zulegen konnte. Über den Daumen gepeilt lag der Anstieg Anfang 2015 gegenüber dem „9/11“ des Jahres 2011 bei 15%, allenfalls bei 20% 😊



EROI's. Quelle © Institut für Festkörperphysik

Doch wie kann es sein? Wenn ich eine WKA habe und eine zweite identische WKA dazu stelle – weit genug weg von der ersten, versteht sich 😊 – so müsste ich doch doppelt so viel Strom herausholen, völlig unabhängig davon, wie der Wind gerade weht. Gerade dies scheint aber zumindest über eine Großzahl von WKA's hinweg bilanziert nicht der Fall zu sein. Vielmehr ist da deutlich eine Art „Sättigung“ erkennbar...

Was ist da los? Stimmen etwa die Daten nicht? Ist es ein rein statistischer Effekt oder eher einer von grundlegender, physikalischer Natur?

Nun, da wir alle so richtig scharf darauf geworden sind, solchen Fragen auf den Grund zu gehen, formulieren wir eine für die [AG Energetik](#) ungewöhnliche (Rechen-) Aufgabe, die im eigentlichen Sinne des Wortes gar keine Rechenaufgabe mehr ist und die da lautet:

Aufgabe: Man beweise oder widerlege das obige Phänomen ➡

Diese Aufgabe ist in der Tat total anders gelagert, als z.B. die Berechnung von [Entropie schwarzer Löcher im LHC](#). Denn hier hatten wir ein klares mathematisches Modell, das nur entsprechend aufzulösen war um zu zeigen, was alles passieren kann und was nicht. Im vorliegenden Fall haben wir zunächst eine Beobachtung, für die wir ein solches Modell erst ausfindig machen müssen.



Quelle © www.fortschrittfreiheit.de

➔ Aufgabe: Die Lösung.

In den nachfolgenden Überlegungen beschränken wir uns auf die Windkraft. Die Solarkraft spielt eine so marginale Rolle, dass sie unser Phänomen kaum erklären kann. Des Rätsels Lösung muss eindeutig in der Windkraft liegen.

Unter einer installierten Leistung  $E_i/t$  (die rote Linie in unseren Diagram) verstehen wir diejenige Leistung, die eine WKA maximal „fahren“ kann. Wenn also beispielsweise von einer einer „5 MW WKA“ die Rede ist, so handelt es sich um eine Windturbine, die bei einem optimalen Wind 5 MW (Voll-) Last fahren (also leisten) kann. Ist der Wind stärker als „optimal“, muss die WKA abgebremst werden, da sie ansonsten Schaden nehmen würde.

Die installierte Leistung ist somit ein eher theoretischer Wert – ja, man könnte fast sagen, eine Art Handelsmerkmal. Denn es dürfte schon eine Rolle spielen, ob ich für eine 3 MW- oder für eine 5 MW WKA Investoren suche. Bei der 5 MW'ter sind die Ertragserwartungen zunächst einmal höher; ob sich diese im konkreten Fall auch erfüllen, steht freilich auf einem ganz anderen Blatt.

Wie auch immer. Die Frage, die sich einem dabei aufdrängt, ist jedenfalls die, ob denn die Erklärung für unser Phänomen (genauer gesagt, dessen Widerlegung in diesem Zusammenhang) nicht einfach in der installierten Leistung zu suchen ist. Denn würde die installierte Leistung mehr den „Handelswert“ widerspiegeln, als die konstruktionsbedingte potentielle Power, wäre schlicht der Verlauf der roten Kurve abzuflachen und schon würde das ganze „passen“. In einer Zeit der allgemeinen EE-Euphorie, VW-Gate etc. würde mich schließlich das bisschen „Hinbiegen“ bei den WKA's wenig überraschen...

Dennoch, unser Phänomen lässt sich damit kaum erklären. Denn erstens ist der Verlauf beider Kurven, wie wir gleich sehen werden, qualitativ anders und zweitens kann und will ich mir nicht vorstellen, dass man bei uns mittlerweile jedes Pappwindrad als 5 MW WKA genehmigt bekommt 😊. Nein, die Erklärung liegt wohl in der Abflachung der (approximierten) „blauen“ Kurve. Doch warum flacht die denn so rapide ab?

Eine der Erklärungen, die mich noch vor OnLine-Stellung dieser Lösung erreicht haben, war die, dass der Anstieg der blauen Kurve dem miserablen Wirkungsgrad der WKA's  $\eta = E_e/E_i$  geschuldet sei, wodurch die eingespeiste Energie zwar mit der installierten sehr wohl (linear) steigt und zwar gem.  $E_e = \eta E_i$ , aber eben entsprechend flach.

Aber stimmt es so? Wohl kaum. Denn wenn ich zu einer bestehenden WKA eine zweite mit einem vergleichbaren  $\eta$  dazu stelle, müsste ich doch definitorisch  $\eta E_i + \eta E_i = 2E_e$ , also die doppelte Energie ernten – völlig egal, wie schlecht das  $\eta$  auch sein mag! Was wir aber beobachten, ist eine offensichtliche Verschlechterung von  $\eta$  in den Jahren 2011-2015. Doch wodurch ist das denn in unserem Beispiel mit den zwei Windturbinen zu erklären? Haben wir etwa die zweite WKA nicht ganz optimal aufgestellt? Vielleicht steht sie ein wenig im Windschatten der ersten? Und wenn ja, kann es sich wirklich so gewaltig auswirken?

Schauen wir noch einmal auf unser Diagram, so stellen wir fest, dass die Abflachung der blauen approximierten Kurve und somit von  $\eta$  ganz und gar nicht linear aussieht, sondern mehr an Quadratwurzel erinnert – oder vielleicht gar an kubische Wurzel?

Moment mal 💡, kubische Wurzel? War da nicht was? Und ob! Da war doch mal eine Berechnung des deutschen Physikers Albert Betz, der seinerzeit, im Jahre 1920 in seinem Aufsatz „*Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren*“ eine Formel für unsere geerntete Energie vorgestellt hat und die da lautete:

$$P_e = \frac{E_e}{t} = A \frac{\rho}{4} v_1^3 \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)$$

Das bedeutet aber, dass sowohl unsere Einspeiseenergie als auch der Wirkungsgrad der WKA mit der 3'er Potenz der Windgeschwindigkeit gehen:

$$E_e, \eta \sim v^3$$

womit doch unser Phänomen erklärt wäre!  
Warum?

Betrachten wir noch einmal unser Beispiel: die erste WKA steht einigermaßen optimal, da zu dem Zeitpunkt, als sie aufgestellt wurde, eine einigermaßen freie Wahl des Standortes bestand. Doch bei der zweiten WKA ist es schon schwieriger gewesen: Bl's, Umwelt- und Landschaftsschützer und sonstige Bedenkenträger, aber auch das schlichte Nicht-Vorhandensein von hohen Hügeln etc. haben es uns nicht leicht gemacht und so mussten wir mit einem suboptimalen Standort Vorlieb nehmen. Die

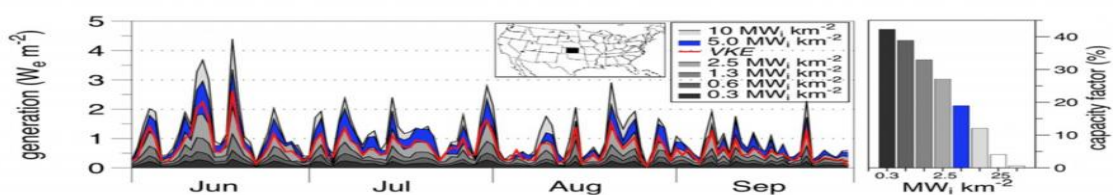


Wirbelschleppen. Quelle © Vattenfall

Windgeschwindigkeit dort ist auch „suboptimal“, sie beträgt etwa nur die Hälfte. Da aber die 3. Potenz der „Hälfte“ wiederum nur 1/8, also etwas mehr als 10% 😊 beträgt, ist es de facto das „quod erat demonstrandum“. Denn nur dieser – nennen wir es – „Betzcher Effekt“ kann den Verlauf der der blauen Kurve wirklich erklären! Der Ansatz über den Wirkungsgrad oder über den „EROI“, wie Eingangs suggeriert, führt hingegen in die Irre, da wir einen linearen Verlauf bekommen müssten, was aber nicht der Fall ist ➡

➡ **Wer mag, darf an dieser Stelle den Umkehrschluss betreiben: Weil wir die hyperlineare Abflachung der Einspeiseenergie haben, findet der Zubau der „installierten“ Windkraft offensichtlich nicht unter optimalen Bedingungen, insbesondere nicht an geeigneten Standorten, statt. Dies kann zweierlei Ursachen haben: entweder sind uns optimale Standorte mittlerweile ausgegangen 😊 oder aber es werden die Folgen der Standort-Abstriche insbesondere in Punkto Windgeschwindigkeit weit unterschätzt – einen Vorsatz wollen wir ja nicht unterstellen... 😊**

(Left) Simulated daily mean electricity generation rates over the Kansas wind farm region (black square on map) for different installed capacities of up to 10 MWi-km<sup>-2</sup>.



Lee M. Miller et al. PNAS 2015;112:11169-11174

©2015 by National Academy of Sciences

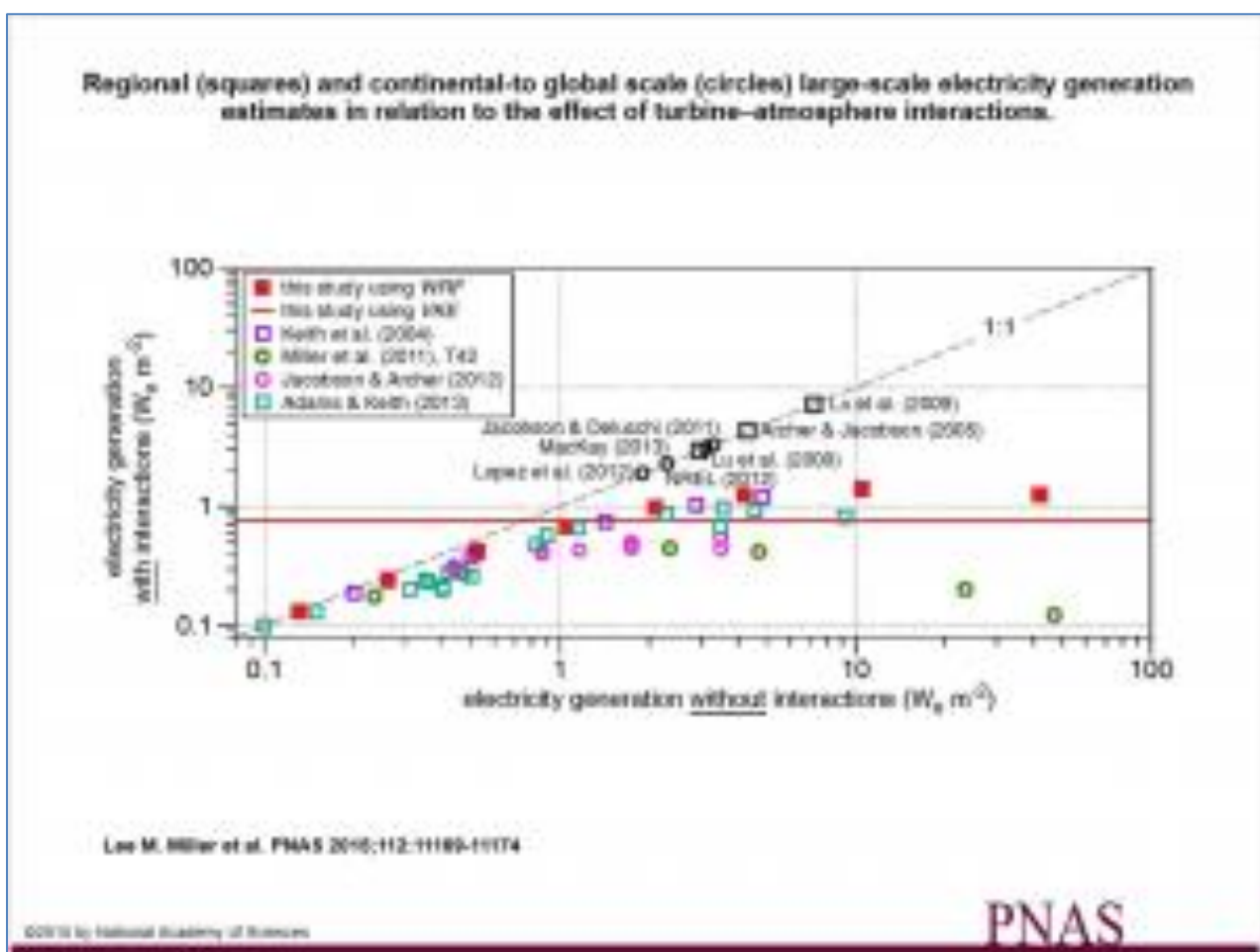
PNAS

Quelle © <http://www.pnas.org/content/112/36/11169.full>

Nun möchte man sagen „na klar, Onshore da wird jede Menge Schindluder getrieben, aber Offshore? Dort gibt es keine »besseren« Standorte, alles ist ja frei“.

Klingt zwar plausibel... aber leider weit gefehlt! Denn wie bereits das Wirbelschleppen-Foto weiter oben suggeriert, kann die Beeinflussung der Luftströmung durch WKA's u.U. kilometerweit nach hinten reichen. Und je nach Windrichtung stehen die hinteren WKA's voll im Strudel der vorderen 😊, was neben anderen negativen Auswirkungen mitunter das erbarmungslose Betzsche Gesetz voll zuschlagen lässt: Es reicht, dass die vordere WKA nur 15% der Windgeschwindigkeit den hinteren Artgenossen raubt, schon produzieren diese 40% weniger.

Dieses Sachverhalts hat sich neulich ein internationales Forscherteam angenommen und eine Studie hierzu veröffentlicht. Das Ergebnis ist mehr als ernüchternd: Demnach arbeitet ein Windpark einigermaßen ohne derartige Störeffekte – aber nur bis zu einer Energiedichte von 1 Watt pro Quadratmeter (also 1 MW/Km<sup>2</sup>)! Geht es mit der Dichte über diesen Schwellenwert hinaus, setzen die besagten Störeffekte ein.



Quelle: <http://www.pnas.org/content/112/36/11169.full>

Und wie ist es in diesem Zusammenhang um unsere Vorzeige-Offshores bestellt? Leider nicht besonders gut. Denn all diese Windparks – ob nun Nord- oder Ostsee, ob in Betrieb oder erst in Planung – weisen Energiedichten von mehreren MWi auf einen km<sup>2</sup> auf. Ein extremes Beispiel liefert der Offshore-Park Riffgat, der mit 108 MW auf gerade mal 6 km<sup>2</sup> im Sinne der obigen Studie als hoffnungslos überladen anzusehen ist. Aber ebenso das andere Vorzeige-Offshore „alpha ventus“ steht Riffgat mit dessen 60 MW auf gerade mal 3,84 km<sup>2</sup> in nichts nach.



Was die empirische Energieausbeute anbelangt, so läuft [Riffgat](#) noch nicht lange genug, um belastbare Zahlen zu liefern. Hingegen behaupten die Betreiber von „[alpha ventus](#)“ seit 2010 alle Erwartungen übertroffen zu haben. Nun, solche „Erwartungen“ sind uns aus dem Alltag durchaus bekannt: in jedem Supermarkt sehen wir den „erwarteten“ Preis A, der aber jetzt durchgestrichen ist und die Ware auf einen Betrag B „reduziert“ worden ist. Die Frage die uns interessiert ist, werden die *berechtigten* Erwartungen, d.h. die aufgrund von technischen Gegebenheiten der jeweiligen WKA's zu erwartenden Energiegewinne tatsächlich erzielt?



Offshore-Windpark Nysted, mit Rødsand 1 (hinten) und Rødsand 2 (vorne).  
Quelle © Wiki-Commons

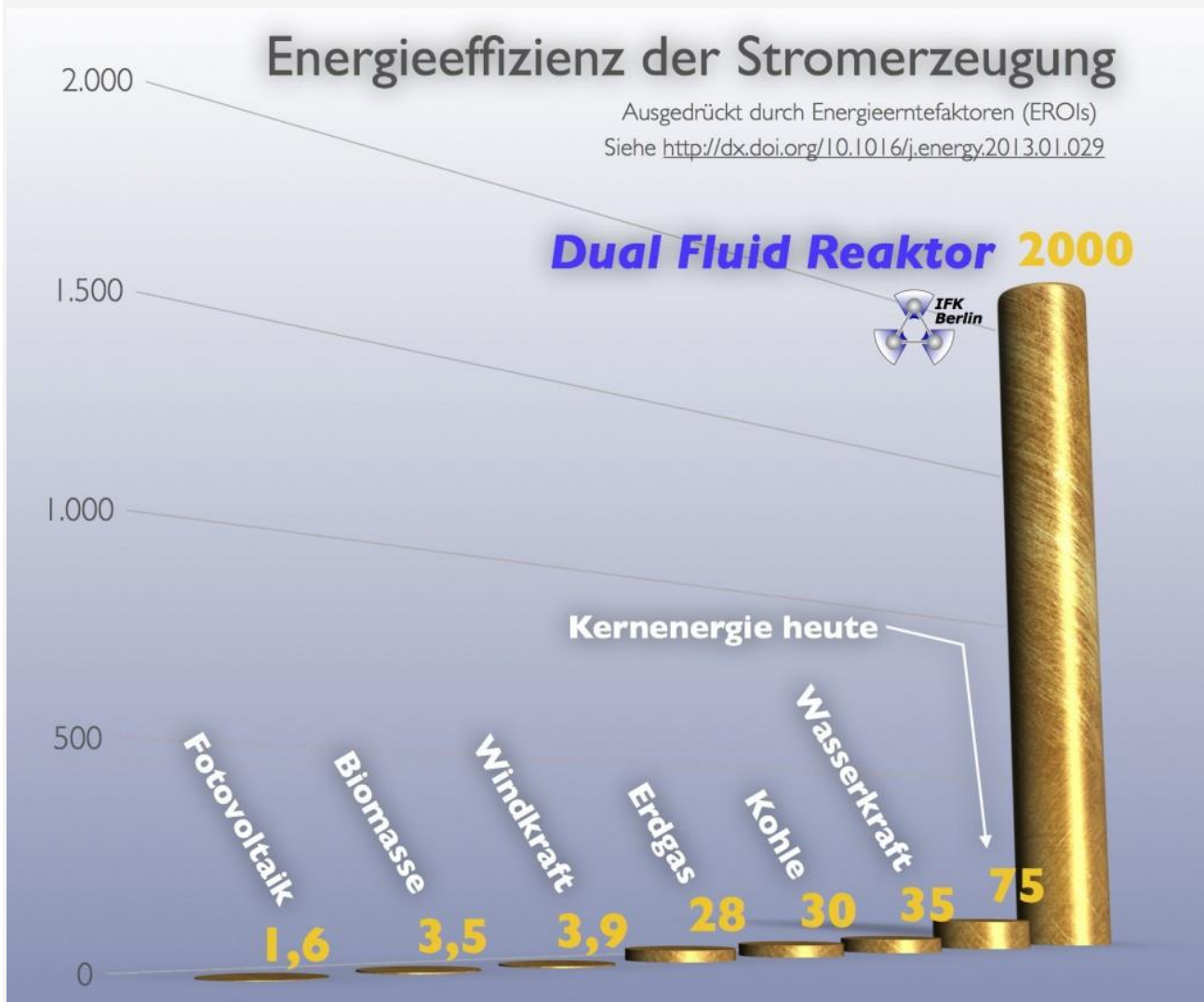
Hierzu picken wir uns einen anderen Offshore-Park heraus und zwar [Nysted](#), bestehend aus den zwei Teilparks Rødsand 1 und 2. Der erstere der beiden läuft bereits seit 2003, während der zweite 2010 in Betrieb gingt. Wie auf der Aufnahme links nebenan zu sehen ist, weist Rødsand 2 eine etwas andere Topologie auf als Rødsand 1, was wohl den schon damals vermuteten und nunmehr belegten Interaktionen zwischen den WKA's geschuldet sein könnte. Aus dem gleichem Grunde dürfte die Energiedichte von Rødsand 2 mit 207 MW auf 36 km<sup>2</sup> etwas geringer ausgefallen sein als bei seinem älteren Pendant.

Interessant sind indes die Erkenntnisse aus den ersten Betriebsjahren von Rødsand 1. Laut [Vindmøller](#) lieferte Rødsand 1 in den Jahren 2004-2007 anstatt der erwarteten 600 GWh lediglich 517 GWh pro Jahr, also etwas über 86%. Kann es wirklich nur der nicht-optimalen Topologie oder der etwas zu hohen Energiedichte geschuldet sein?

Nun, die kubische Wurzel aus 0.86 beträgt 0.95, also dieser Effekt wäre alleine damit erklärt, wenn beide Störeinflüsse lediglich 5% der Windgeschwindigkeit rauben würden. Das kann durchaus sein,

wobei auch die effektiv ausgebliebene Windkraft (oder deren falsche Richtung ☹) in diese Messung mit eingeflossen sein dürfte.

➔ Fazit. Diskussion



Bereits geringfügige Abstriche bei der Windgeschwindigkeit schicken den Stromertrag bei den WKA's mit 3'er Potenz in den Keller, was zu einer hyperlinearen Abflachung der Einspeiseenergie führt. Dabei ist es zweitrangig, ob die Anlagen nun Onshore oder Offshore laufen. Die bekanntlich niedrigen Energiedichten der EE's im Allgemeinen und der WKA's im Besonderen bringen uns rasch an deren Grenzen und tangieren so oder so die Input-Geschwindigkeit. Den Rest besorgt dann die mathematische Wucht der 3'er Potenz.

Besonders kritisch wird es im Hinblick auf den Erntefaktor, sog. EROI. Wenn wir gnädig sind und den EROI=4 ansetzen – was für eine Offshore-WKA gerade so hinkommen dürfte – reicht bereits eine um ein Drittel geminderte Windkraft (dürfte Onshore der Normalfall sein!) um den EROI auf 1 absacken zu lassen. Eine solche WKA ist dann, unter energetischen Gesichtspunkten betrachtet, ein reiner Durchlaufposten, allerdings mit dem bedauerlichen Impact in die Biosphäre, der ja mit der Windkraft untrennbar verbunden ist.