

Das Windenergiepotenzials Deutschlands

Grenzen und Konsequenzen grossräumiger Windenergienutzung



Axel Kleidon

Max-Planck-Institut für Biogeochemie
akleidon@bgc-jena.mpg.de

DPG Jahrestagung, März 2023

Wieviel Windenergie können wir erwarten?



2021: 28443 Turbinen

58.1 GW Installierte Kapazität

100.7 TWh/a von 550.6 TWh/a

18.3%

<https://www.facebook.com/aliceweidel/posts/pfbid02ENNEmGdbJmFiqEyVayDe8KFvM792sWNLnchqNpcS5wM6wc1zxiqBZQenMrPwcKEMI>

Wieviel Windenergie können wir erwarten?



INSTALLIERTE LEISTUNG PRO GEBIET



	252 Gigawatt	Gesamtleistung installiert 198 GW an Land 54 GW auf See 310 % Zuwachs [2019]
	38.375 Anlagen	35.000 an Land 3.375 auf See 24 % Zuwachs [2019]
	2 Prozent	der Gesamtfläche pro Bundesland
	960 Terawattstunden	erzeugter Strom 770 TWh an Land 260 TWh auf See 627 % Zuwachs [2019]
	650 Mio. Tonnen CO₂	vermiedene Treibhausgase [CO ₂ -Equivalent] Entspricht 75% der deutschen Emissionen 2018 [866 Mio. t]
	185 Prozent	Deckung des deutschen Stromverbrauchs 2018 [520 TWh]

2021: 28443 Turbinen
58.1 GW Installierte Kapazität
100.7 TWh/a von 550.6 TWh/a **18.3%**

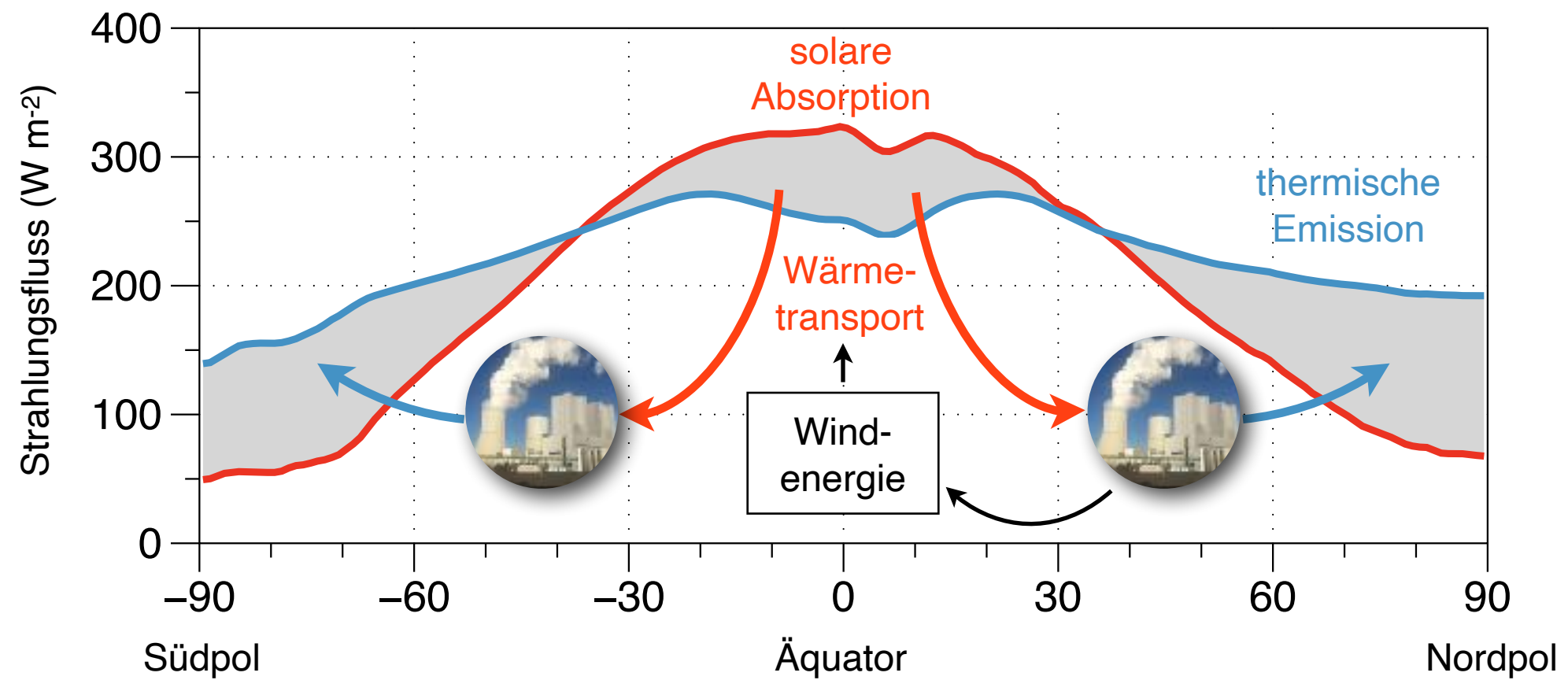
200 GW onshore
770 TWh/a
KF von 43.9%

54 GW offshore
260 TWh/a
KF von 43.9%

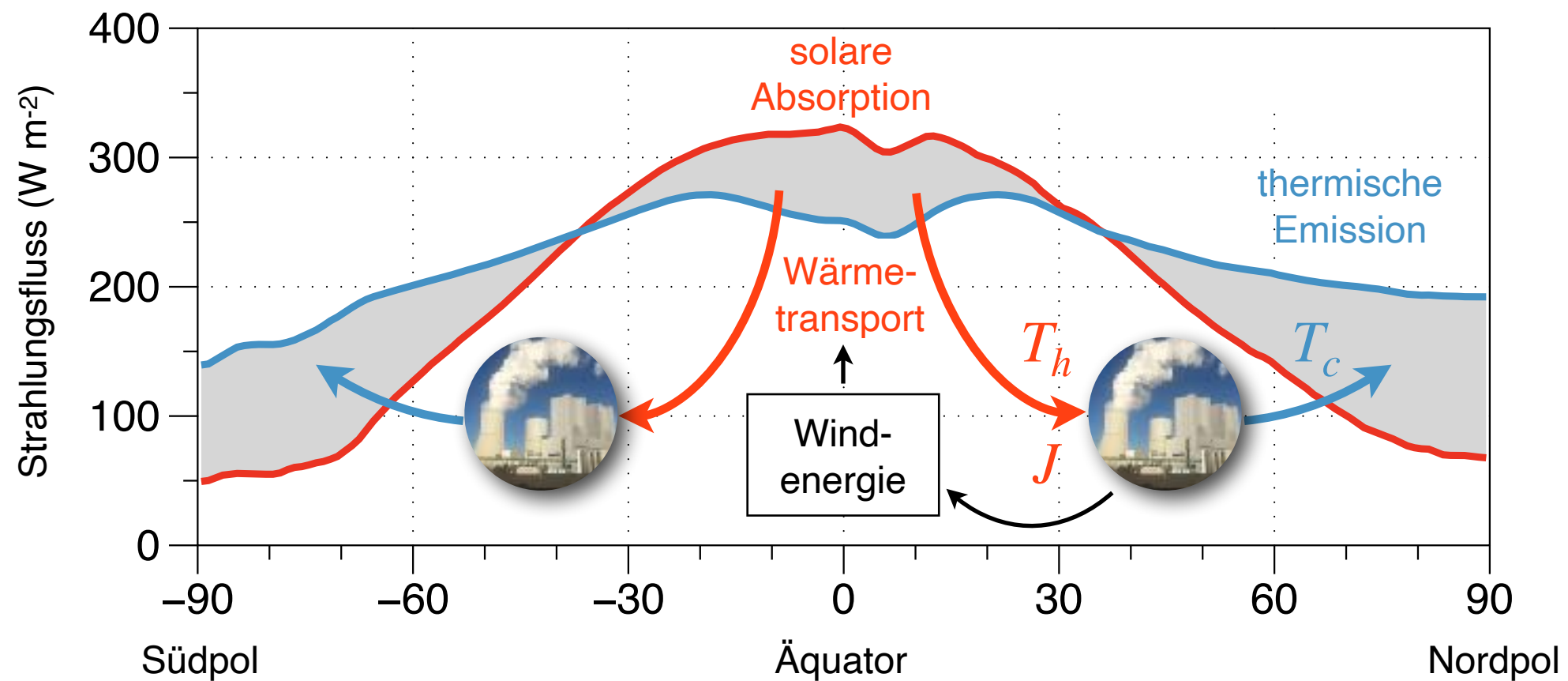
<https://www.facebook.com/aliceweidel/posts/pfbid02ENNEmGdbJmFiqEyVayDe8KFvM792sWNLnchqNpcS5wM6wc1zxiqBZQenMrPwcKEMI>

https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20220302_Faktencheck_Wie_viele_Anlagen_braucht_das_Land_final.pdf

Erzeugung von großskaliger Windenergie



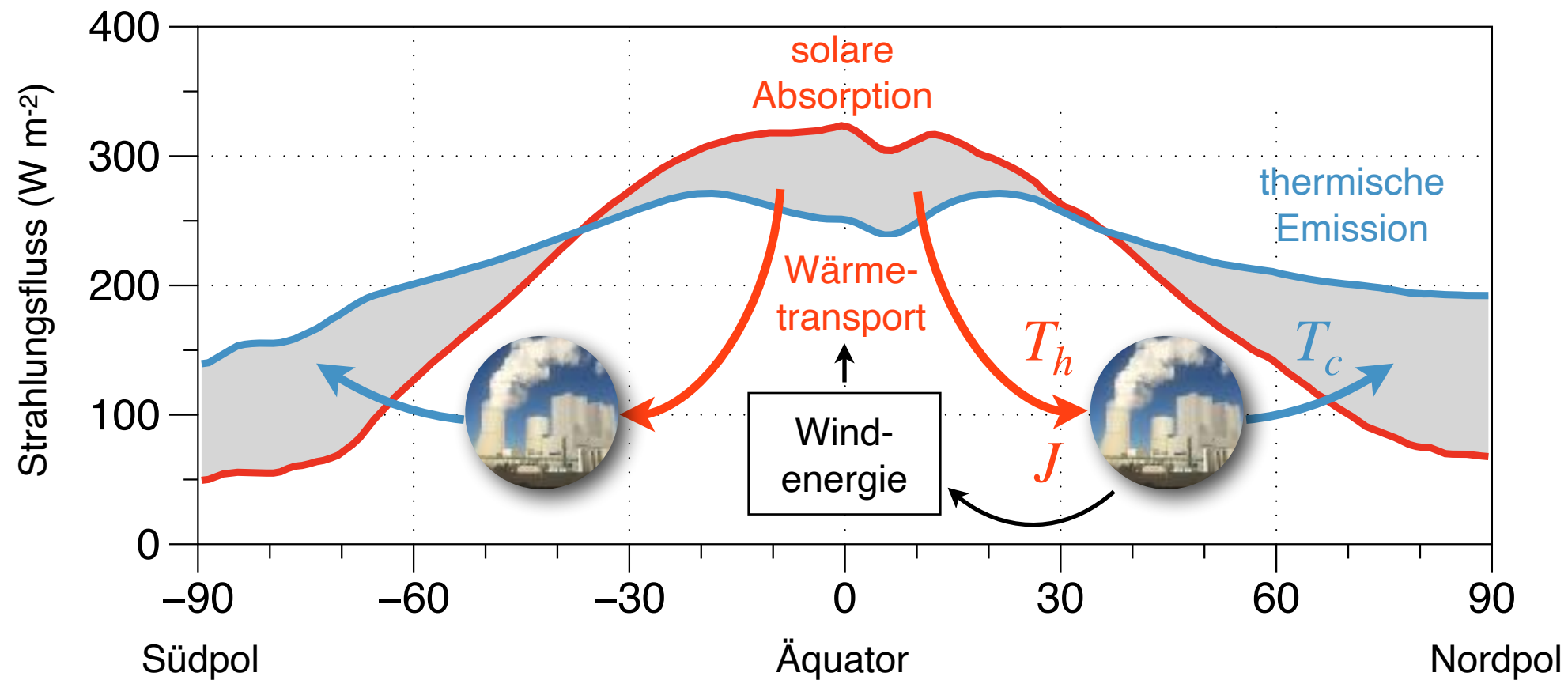
Erzeugung von großskaliger Windenergie



Thermodynamische
Grenze:

$$G = J \cdot \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

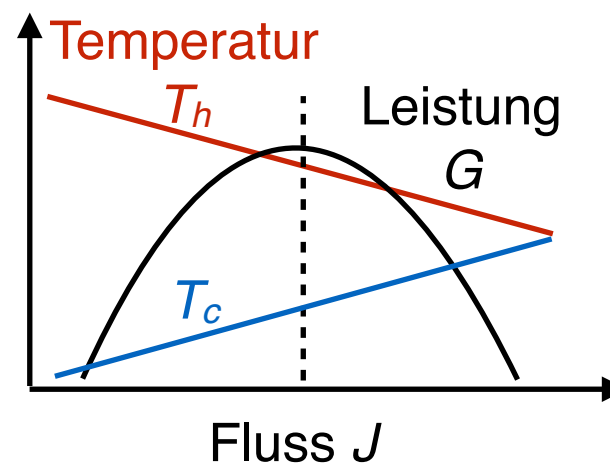
Erzeugung von großskaliger Windenergie



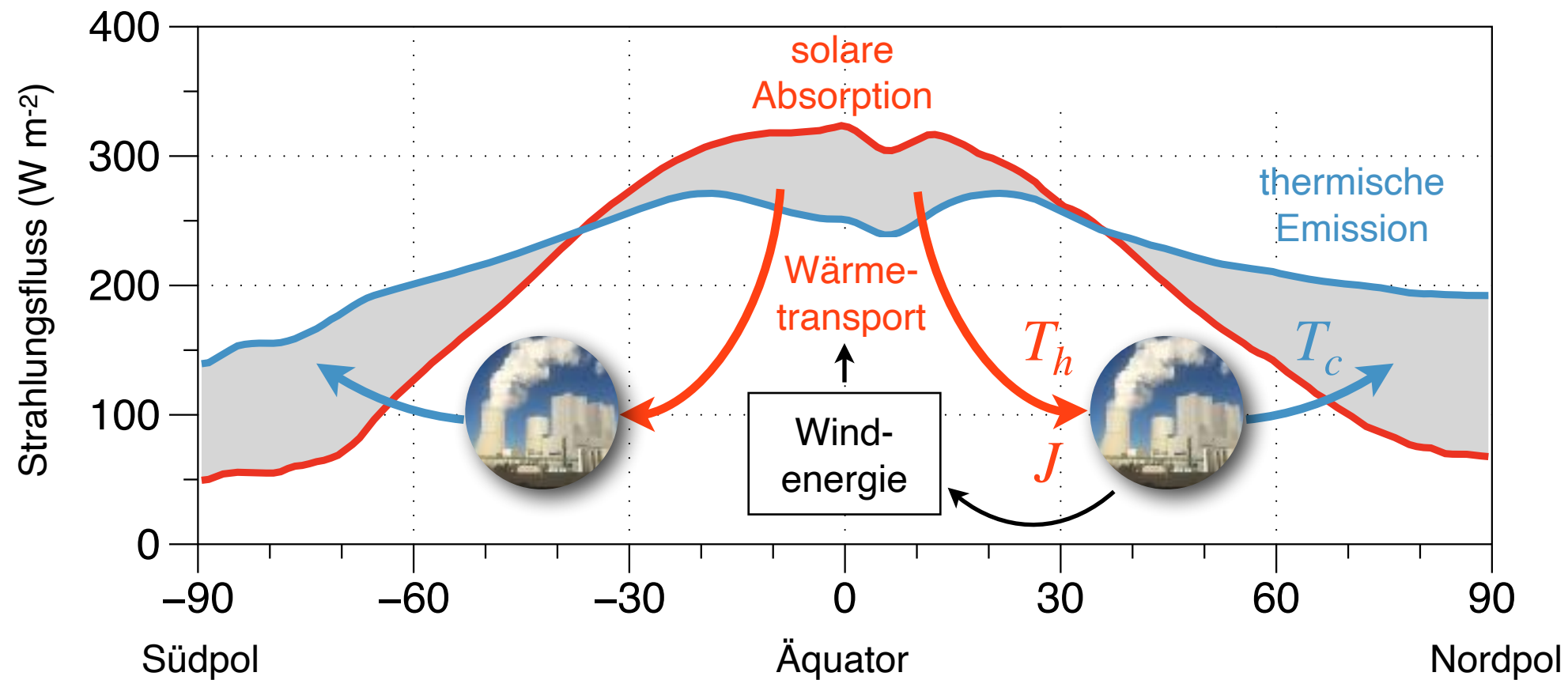
Thermodynamische Grenze:

$$G = J \cdot \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

Mehr Transport
→ geringere Effizienz:



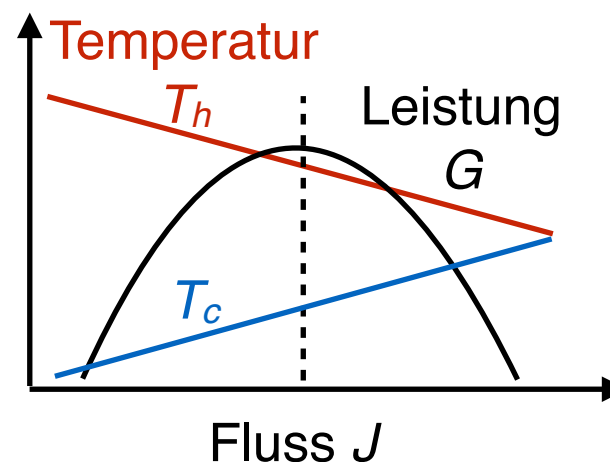
Erzeugung von großskaliger Windenergie



Thermodynamische Grenze:

$$G = J \cdot \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

Mehr Transport
→ geringere Effizienz:

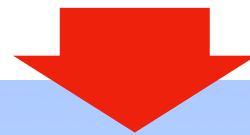


Maximale Leistung:

Wärmefluss:	50 W m^{-2}
$T_h - T_c$:	$\approx 30 \text{ K}$
Leistung:	$0.5 \times 50 \times 10\%$ $\approx 2.5 \text{ W m}^{-2}$
Global:	$\approx 1000 \text{ TW}$
Effizienz:	$\approx 1\%$



Eintrag kinetischer Energie
aus der freien Atmosphäre



$2 - 6 \text{ W m}^{-2}$

1-2 km

$\approx 50\%$



Reibungsverlust
in der Grenzschicht



*Reduktion der
Windgeschwindigkeit
durch Windturbinen*

$\approx 50\%$



Boden-
reibung



Mischung
im Windschatten



Elektrische
Energie

“VKE” Schätzung

1. Impulserhaltung:

$$J_{m,in} = \tau + F_{turb}$$

2. Reibung an der Oberfläche:

$$\tau = \rho C_d v^2$$

3. Impulsentzug der Turbinen:

$$F_{turb} = n \cdot \eta \cdot A_{rotor} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

4. Windgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{1 - \frac{n\eta A_{rotor}}{2C_d + n\eta A_r}} \cdot v_0$$

5. Ertrag der Windturbinen:

$$G_{turb} = F_{turb} \cdot v$$

6. Maximaler Ertrag über $dG_{turb}/dn = 0$:

$$v_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot v_0$$
$$G_{turb} = \frac{2}{3^{3/2}} \cdot J_{ke} \quad (\approx 38\% D_{fric})$$

“VKE” Schätzung

1. Impulserhaltung:

$$J_{m,in} = \tau + F_{turb}$$

2. Reibung an der Oberfläche:

$$\tau = \rho C_d v^2$$

3. Impulsentzug der Turbinen:

$$F_{turb} = n \cdot \eta \cdot A_{rotor} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

4. Windgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{1 - \frac{n\eta A_{rotor}}{2C_d + n\eta A_r}} \cdot v_0$$

5. Ertrag der Windturbinen:

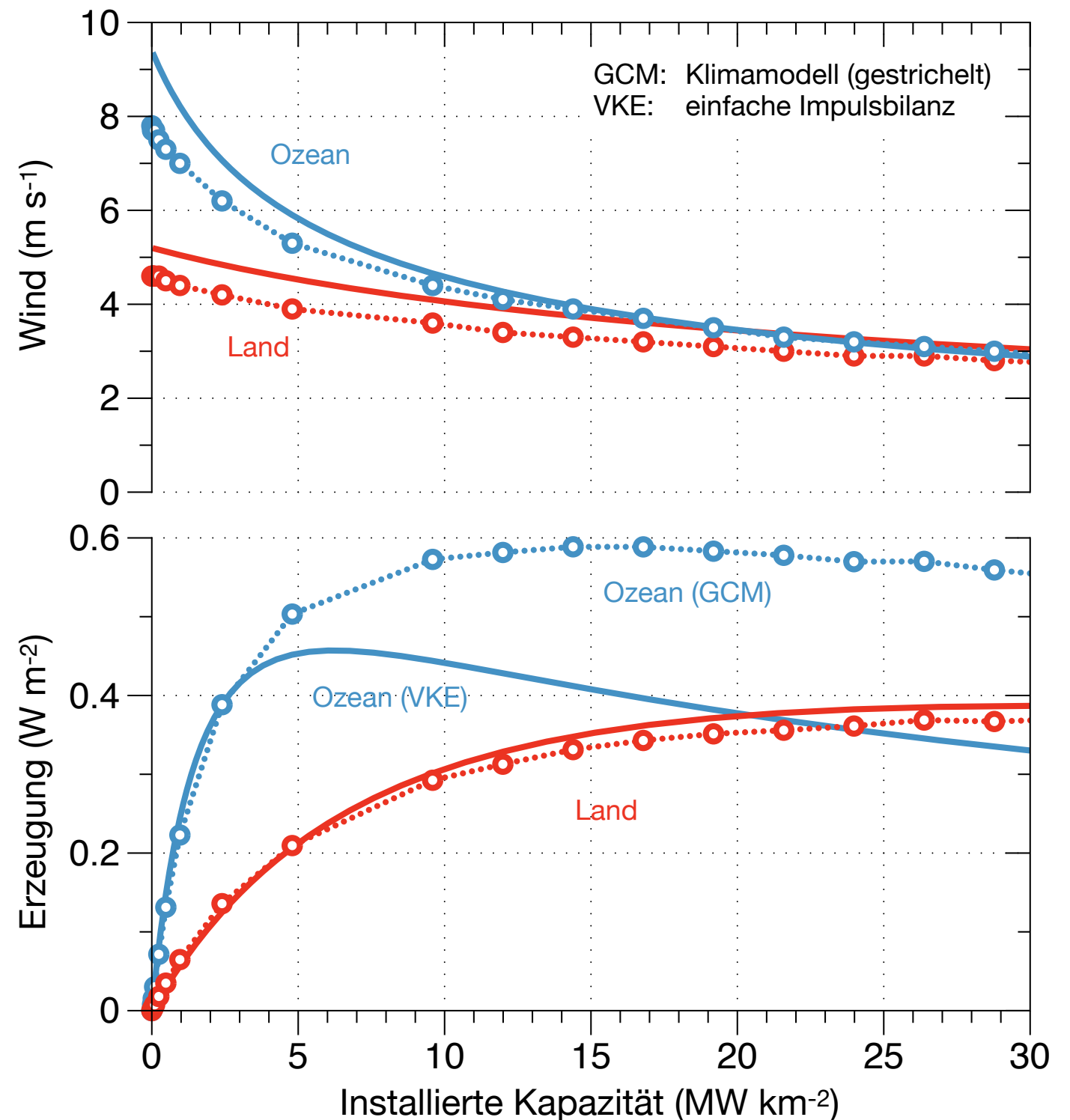
$$G_{turb} = F_{turb} \cdot v$$

6. Maximaler Ertrag über $dG_{turb}/dn = 0$:

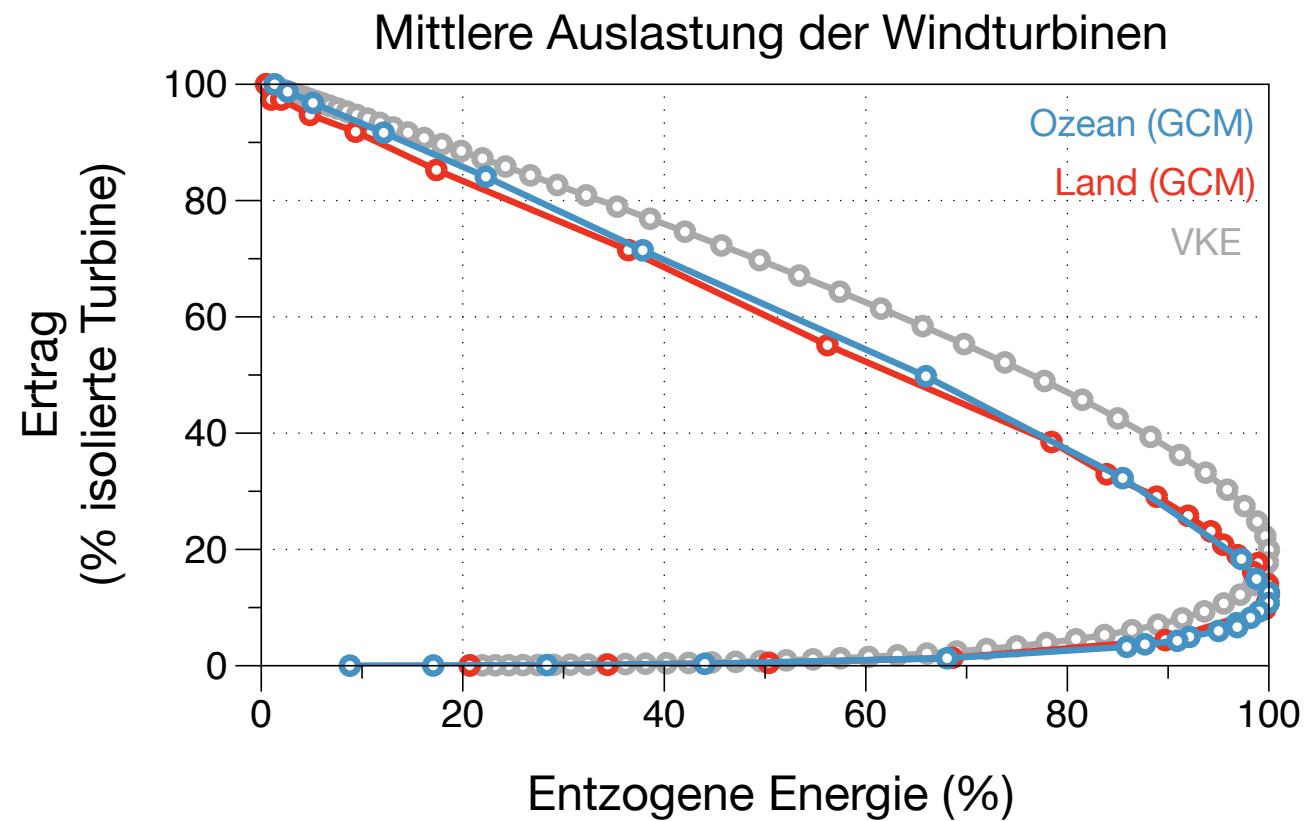
$$v_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot v_0$$

$$G_{turb} = \frac{2}{3^{3/2}} \cdot J_{ke} \quad (\approx 38\% D_{fric})$$

globale Klimasimulationen



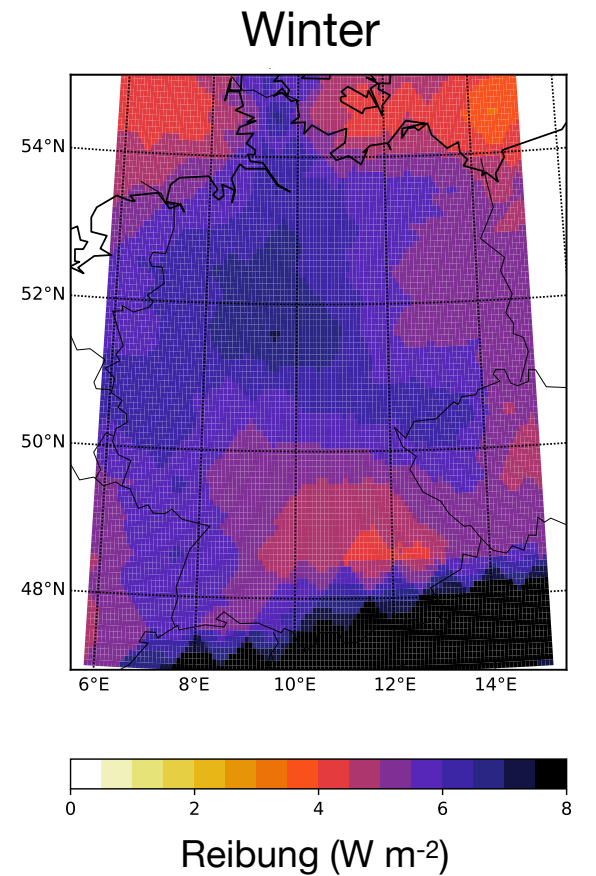
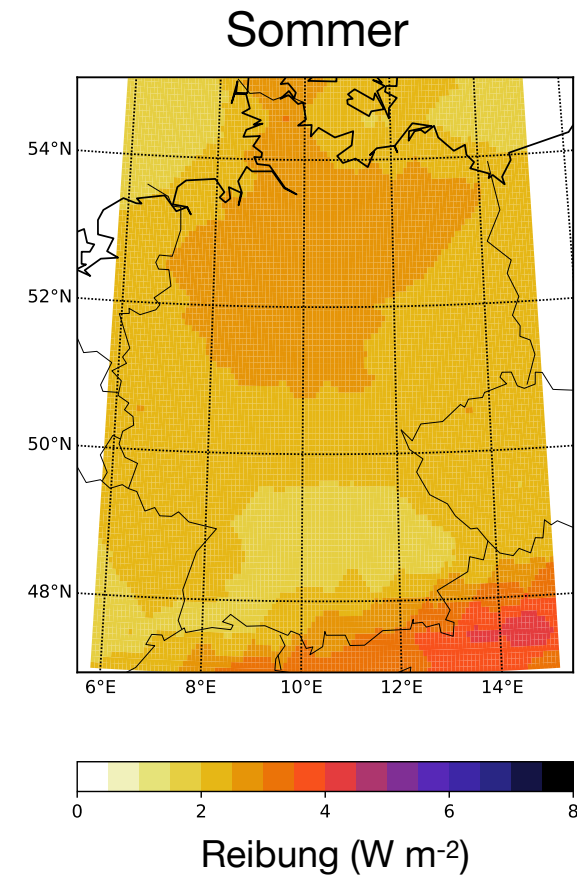
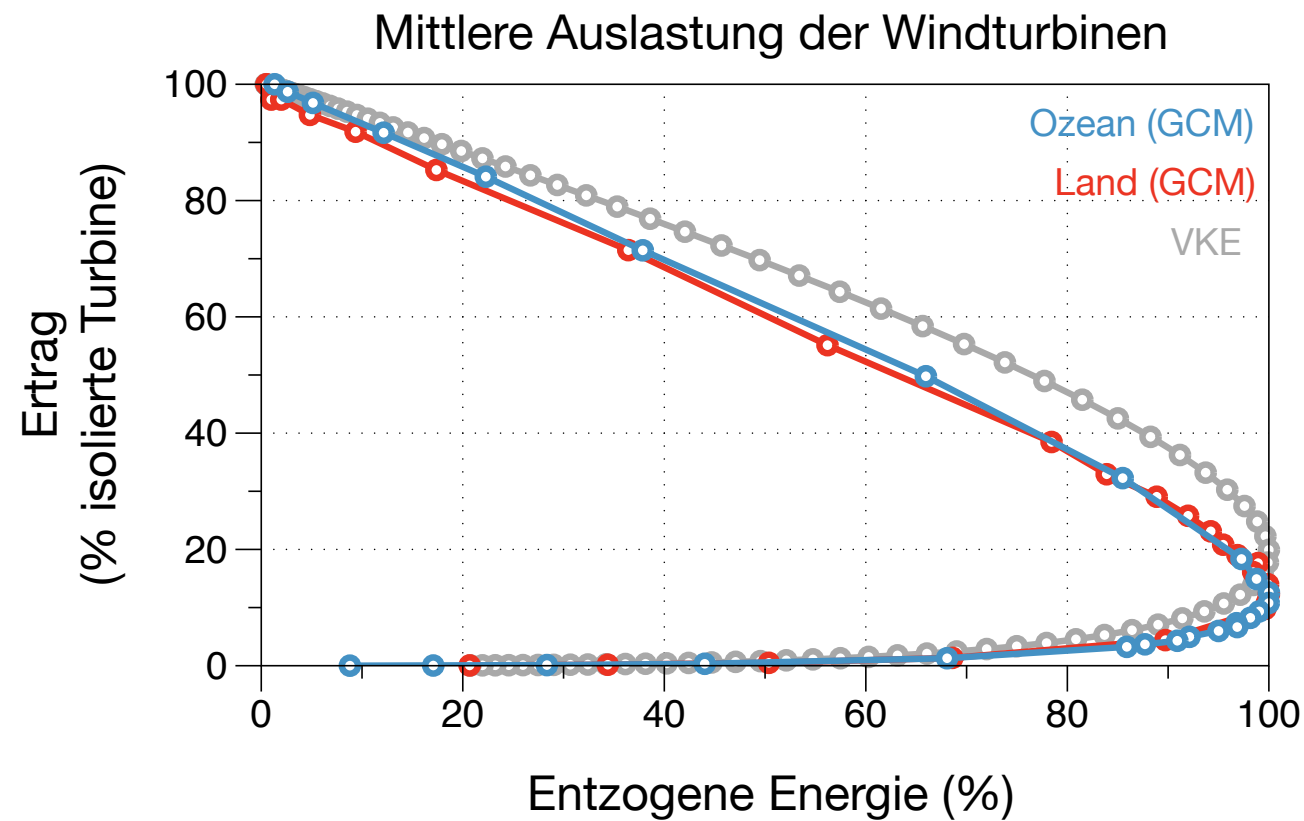
Anwendung auf 200 GW in Deutschland



Kapazitätsfaktor:

$$f_{cap} \approx f_{cap,max} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y_0}{Y_{max}} \right)$$

Anwendung auf 200 GW in Deutschland



Kapazitätsfaktor:

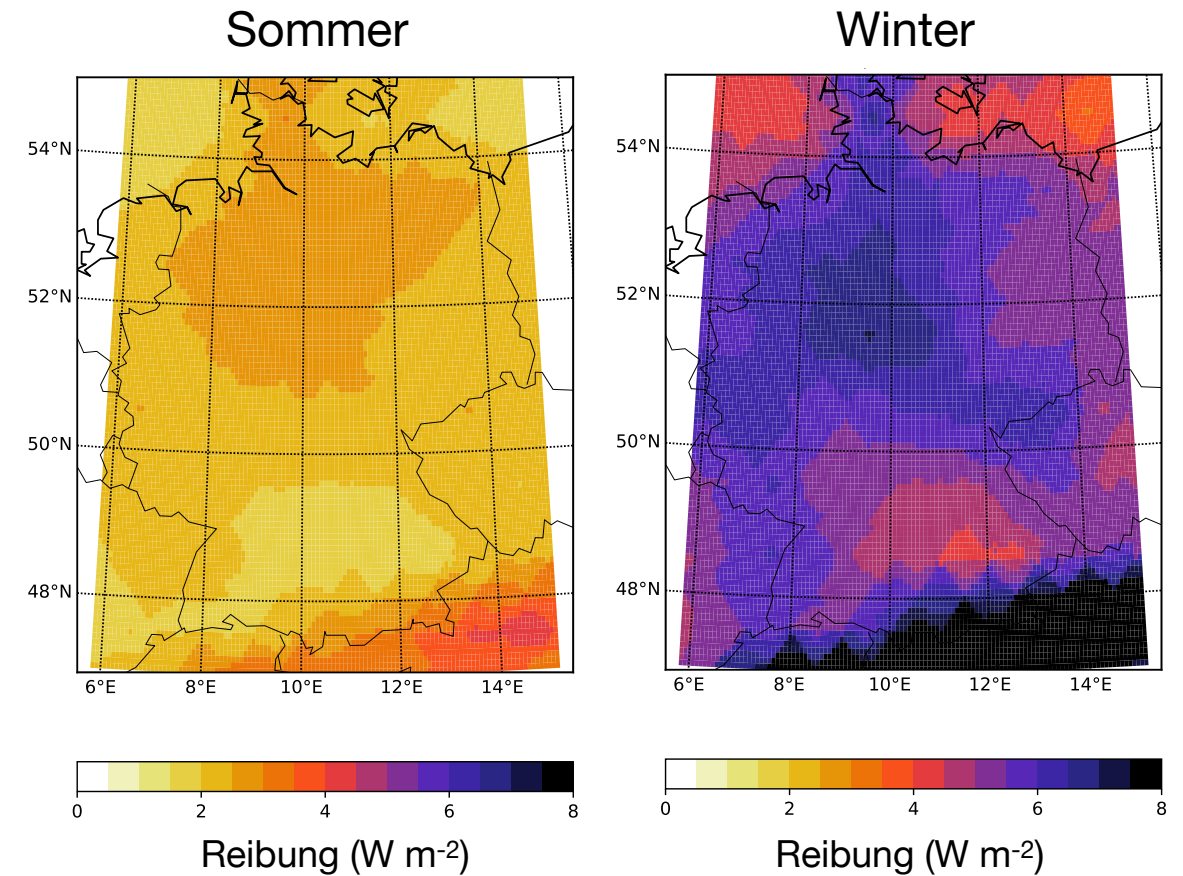
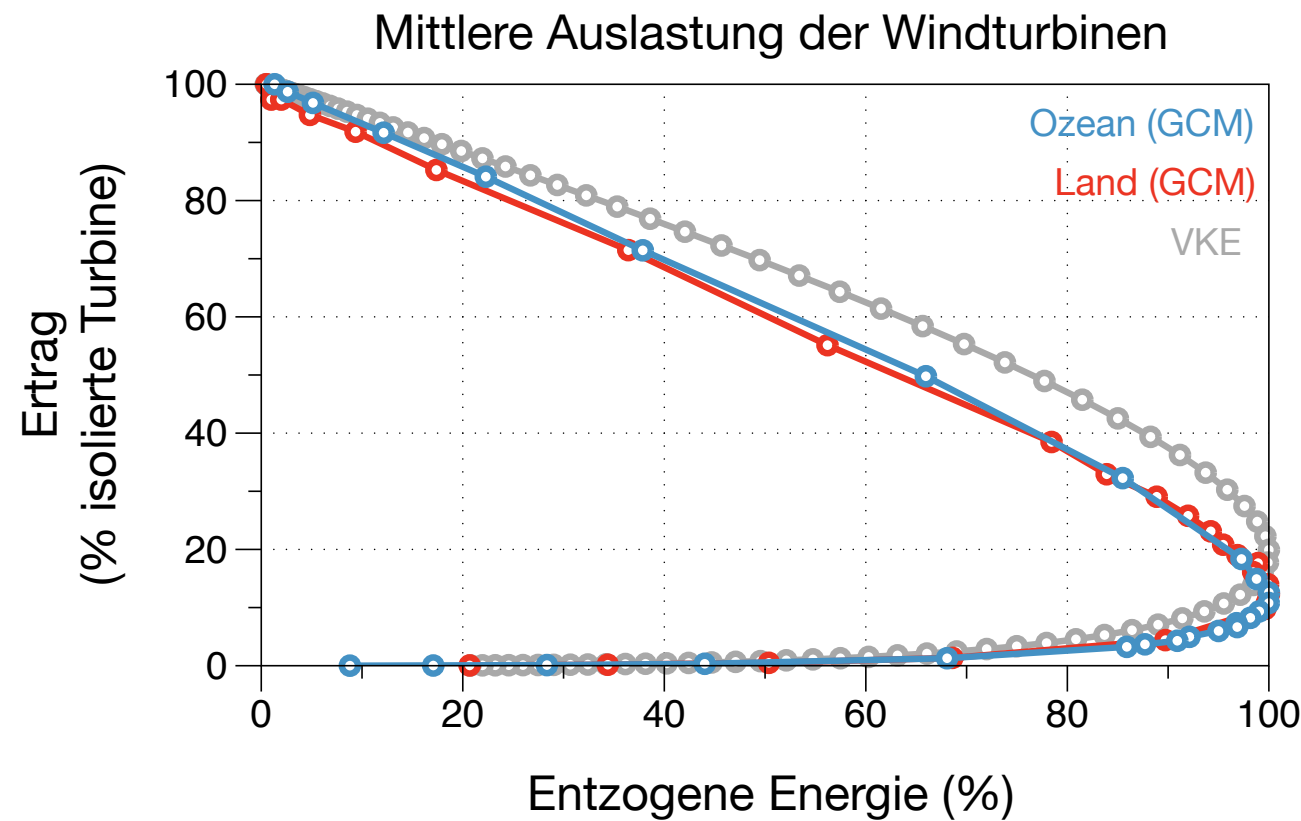
$$Y_0 \approx 20\% \times 200 \text{ GW} \\ \approx 350 \text{ TWh/a}$$

$$f_{cap} \approx f_{cap,max} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y_0}{Y_{max}} \right)$$

$$f_{cap,max} \approx 20\%$$

$$Y_{max} \approx 4 \text{ W m}^{-2} \times 0.5 \times 0.38 \times 3.6 \times 10^5 \text{ km}^2 \\ \approx 2400 \text{ TWh/a}$$

Anwendung auf 200 GW in Deutschland



Kapazitätsfaktor:

$$Y_0 \approx 20\% \times 200 \text{ GW} \\ \approx 350 \text{ TWh/a}$$

$$f_{cap} \approx f_{cap,max} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y_0}{Y_{max}} \right)$$

$$f_{cap,max} \approx 20\%$$

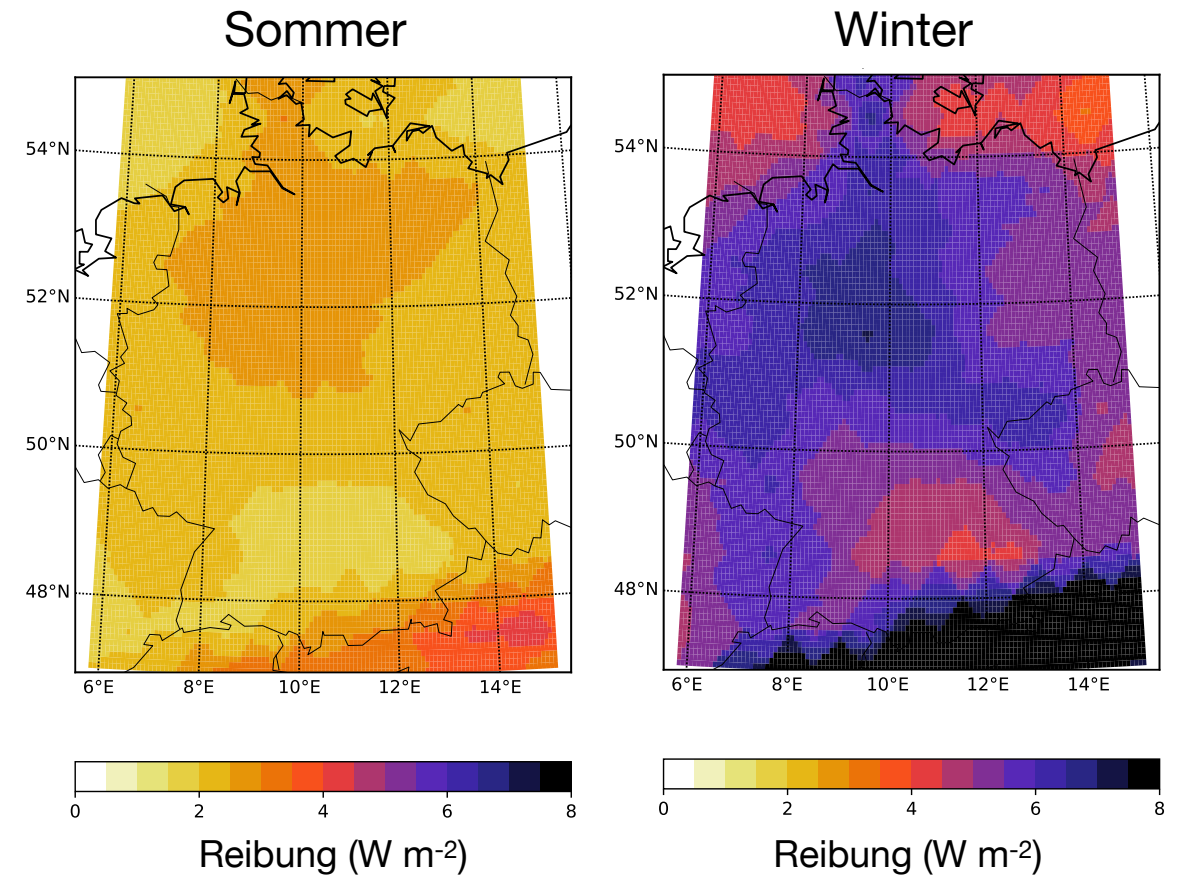
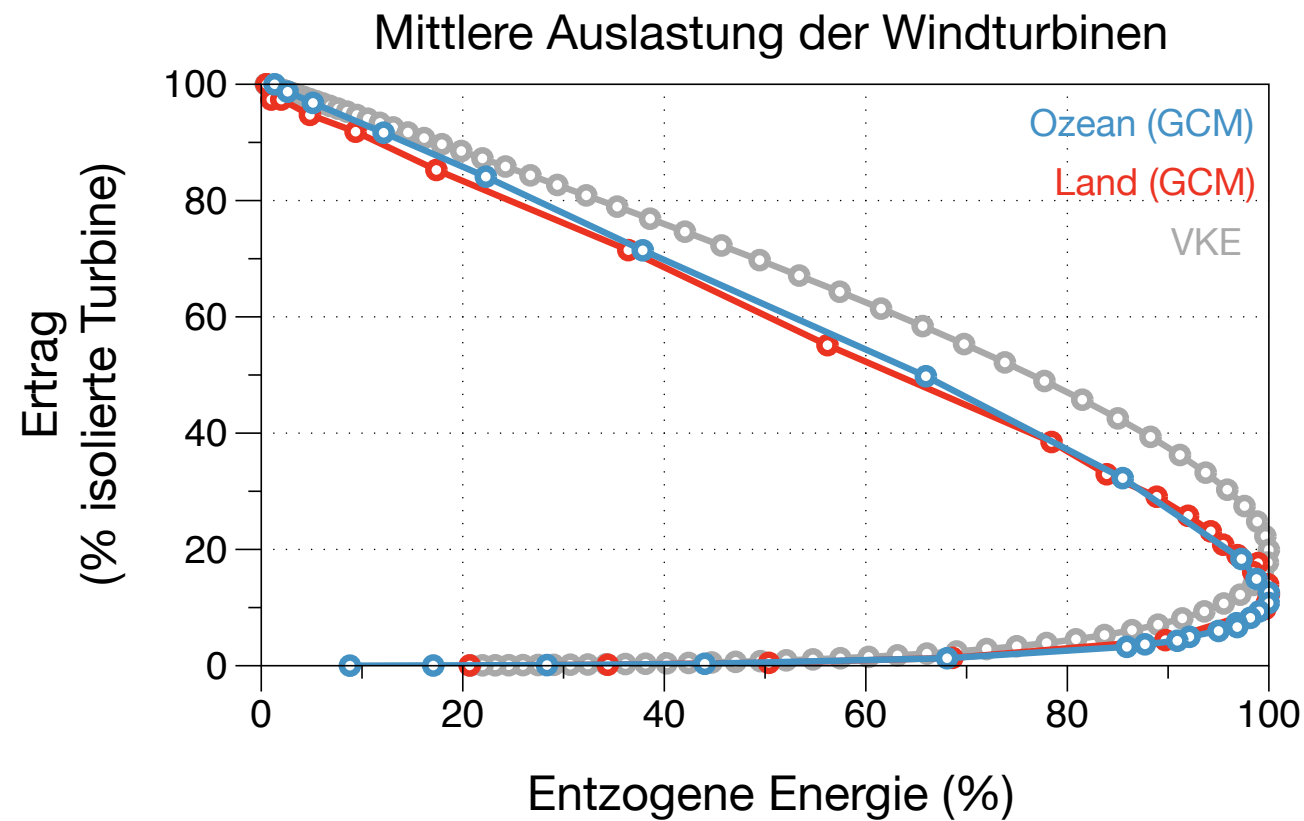
$$Y_{max} \approx 4 \text{ W m}^{-2} \times 0.5 \times 0.38 \times 3.6 \times 10^5 \text{ km}^2 \\ \approx 2400 \text{ TWh/a}$$

$$\text{Ertrag: } 350 \text{ TWh a}^{-1} \rightarrow 320 \text{ TWh a}^{-1}$$

$$\approx -10\%$$

$\approx 60\%$
gegenwärtiger
Stromverbrauch

Auswirkungen von 200 GW in Deutschland



Kapazitätsfaktor:

$$Y_0 \approx 20\% \times 200 \text{ GW} \\ \approx 350 \text{ TWh/a}$$

$$f_{cap} \approx f_{cap,max} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y_0}{Y_{max}} \right)$$

$$f_{cap,max} \approx 20\%$$

$$Y_{max} \approx 4 \text{ W m}^{-2} \times 0.5 \times 0.38 \times 3.6 \times 10^5 \text{ km}^2 \\ \approx 2400 \text{ TWh/a}$$

Ertrag: 320 TWh a⁻¹

Reibung: 12 500 TWh a⁻¹

$\approx 2.6\%$

200 GW Windenergie in Deutschland

DOI: 10.1002/piuz.202301670

Grenzen und Konsequenzen großräumiger
Onshore-Windenergienutzung

Windenergiepotenzial von Deutschland

AXEL KLEIDON

Der Umbau unseres Energiesystems zu erneuerbaren Energien ist notwendig, um das Klima nicht weiter zu erhitzen und Klimaneutralität zu erreichen. Der weitere Ausbau der Windenergie spielt dabei in Deutschland eine wichtige Rolle. Aber wieviel Windenergie lässt sich an Land gewinnen? Und was sind die möglichen Folgen für die Atmosphäre, wenn immer mehr Windenergie genutzt wird?



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Bis 2050 will die Bundesregierung das Ziel eines klimaneutralen Energiesystems erreichen. Dieses Ziel sieht einen starken Ausbau der Windenergie vor, und dafür sollen 2% der Fläche Deutschlands zur Verfügung stehen. Szenarien verschiedener Institutionen übersetzen dies in etwa 150–200 GW an installierter Leistung, die 330–770 TWh pro Jahr zur Stromerzeugung beitragen. Beispielfhaft sei hier auf die Studien von Agora Energiewende und dem Bundesverband Windenergie verwiesen [1, 2]. Gegenwärtig

sind lediglich 56 GW an Leistung installiert, verteilt auf 28230 Windturbinen, die Ende 2021 in Deutschland standen [3]. Diese Windturbinen erzeugten 90,3 TWh/Jahr an Strom und trugen bislang knapp 16% zur gegenwärtigen Stromerzeugung von 570 TWh pro Jahr bei (Stand: 2021, [4]).

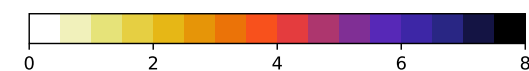
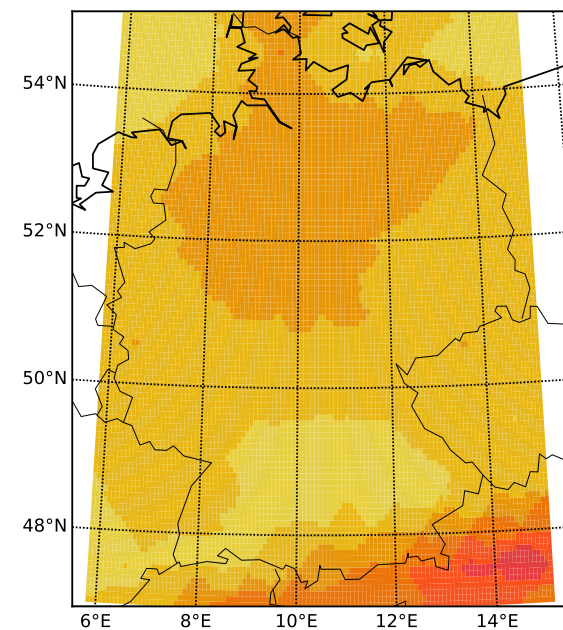
Dies bedeutet, dass wir einen starken Zuwachs von Windenergienutzung in den nächsten Jahrzehnten brauchen, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Aber wieviel Windenergie gibt es in Deutschland, und wieviel davon kann genutzt werden? Welche Auswirkungen hat es für die Atmosphäre, wenn ihr durch die Windturbinen mehr und mehr Bewegungsenergie entzogen wird? Während bei solchen Szenarien häufig das technisch Mögliche im Vordergrund steht, wollen wir hier die Physik der Atmosphäre betrachten und einfache Abschätzungen ableiten, die Antworten auf diese Fragen geben können.

Wie Windenergie nach Deutschland kommt

Um die Größenordnung abzuschätzen, wieviel Windenergie in Deutschland erzeugt werden kann, sehen wir uns zunächst an, woher und wieviel Windenergie nach Deutschland kommt. Windturbinen in Deutschland nutzen überwiegend großskalige Winde, die zusammen mit den Hoch- und Tiefdruckgebieten in den mittleren Breiten auftreten. Diese Gebiete sind direkt mit der großskaligen atmosphärischen Zirkulation verbunden. Sie wird angetrieben durch die planetaren Unterschiede in Solarstrahlung: Tropische Gebiete absorbieren mehr Solarstrahlung als die mittleren Breiten und Polargebiete, somit sind die Tropen wärmer und die Pole kälter.

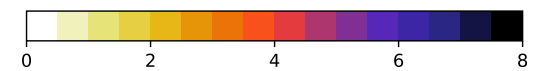
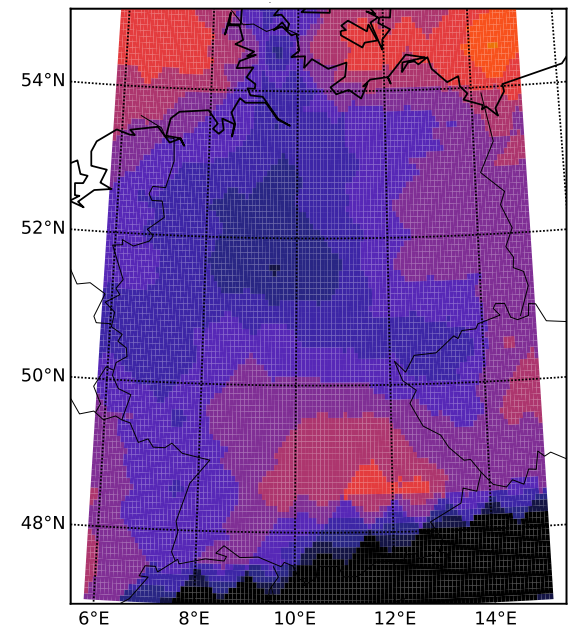
Solche Temperaturunterschiede führen zu unterschiedlichen Luftdichten, mit dem Resultat, dass in warmen Gebieten der Luftdruck mit der Höhe weniger stark abfällt, was potentielle Energie erzeugt. Diese ist wiederum verbunden mit Luftdruckunterschieden in der mittleren Atmosphäre, dort, wo das Wettergeschehen hauptsächlich stattfindet. Luft wird beschleunigt, Masse wird bewegt und umgelagert. Damit wird potentielle Energie abgebaut, Wärme wird transportiert, und die Unterschiede in der solaren Erwärmung gleichen sich aus. Kinetische Energie spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie mit der Bewegung und dem

Sommer



Reibung (W m^{-2})

Winter



Reibung (W m^{-2})

Effekt auf Ertrag:

$350 \text{ TWh a}^{-1} \rightarrow 320 \text{ TWh a}^{-1}$
($\approx 60\%$ gegenwärtiger Stromverbrauch)

$\approx -10\%$

Effekt auf Atmosphäre:

Reibung: $12\,500 \text{ TWh a}^{-1}$

$\approx 2.6\%$