

Limits to Wind Energy: From the Physical Basis to Practical Implications

Axel Kleidon

Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany

akleidon@bgc-jena.mpg.de

How Much Energy can Wind Turbines Provide?

Wind conditions
Turbine characteristics
Siting specifications



Estimated electricity

Common approach

The common approach to estimate wind resource potentials uses information of wind conditions, turbine characteristics and siting specifications to estimate the yield.

It does not account for the response of the atmosphere to the removal of kinetic energy by the wind turbines.

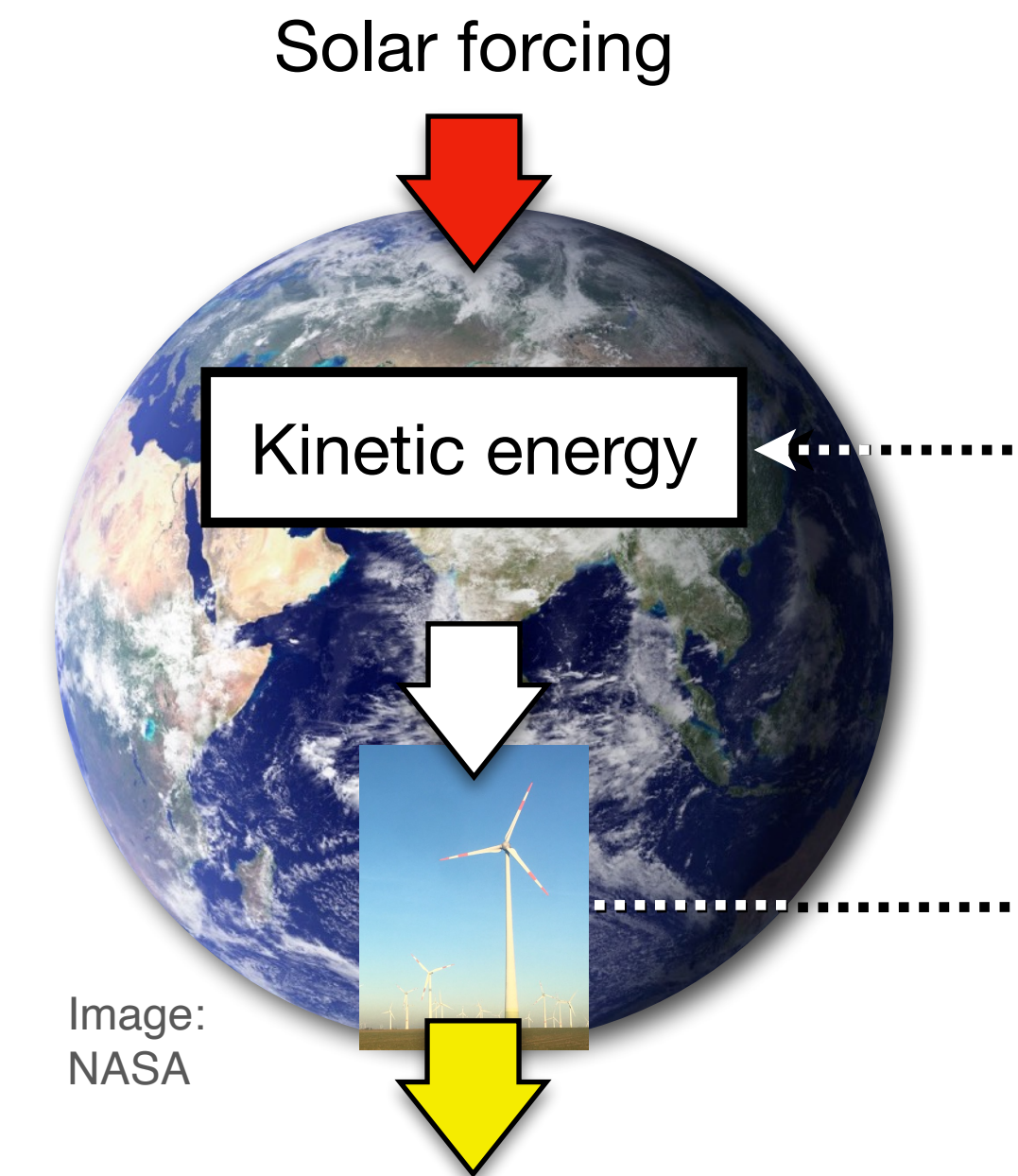


Image: NASA

Estimated electricity

Earth system approach

An Earth system approach considers the whole sequence from solar radiation to the kinetic energy of the winds to the energy extracted by wind turbines, including relevant interactions.

Removal of Kinetic Energy

This approach yields substantially lower potentials.

Outline: Limits to Wind Energy

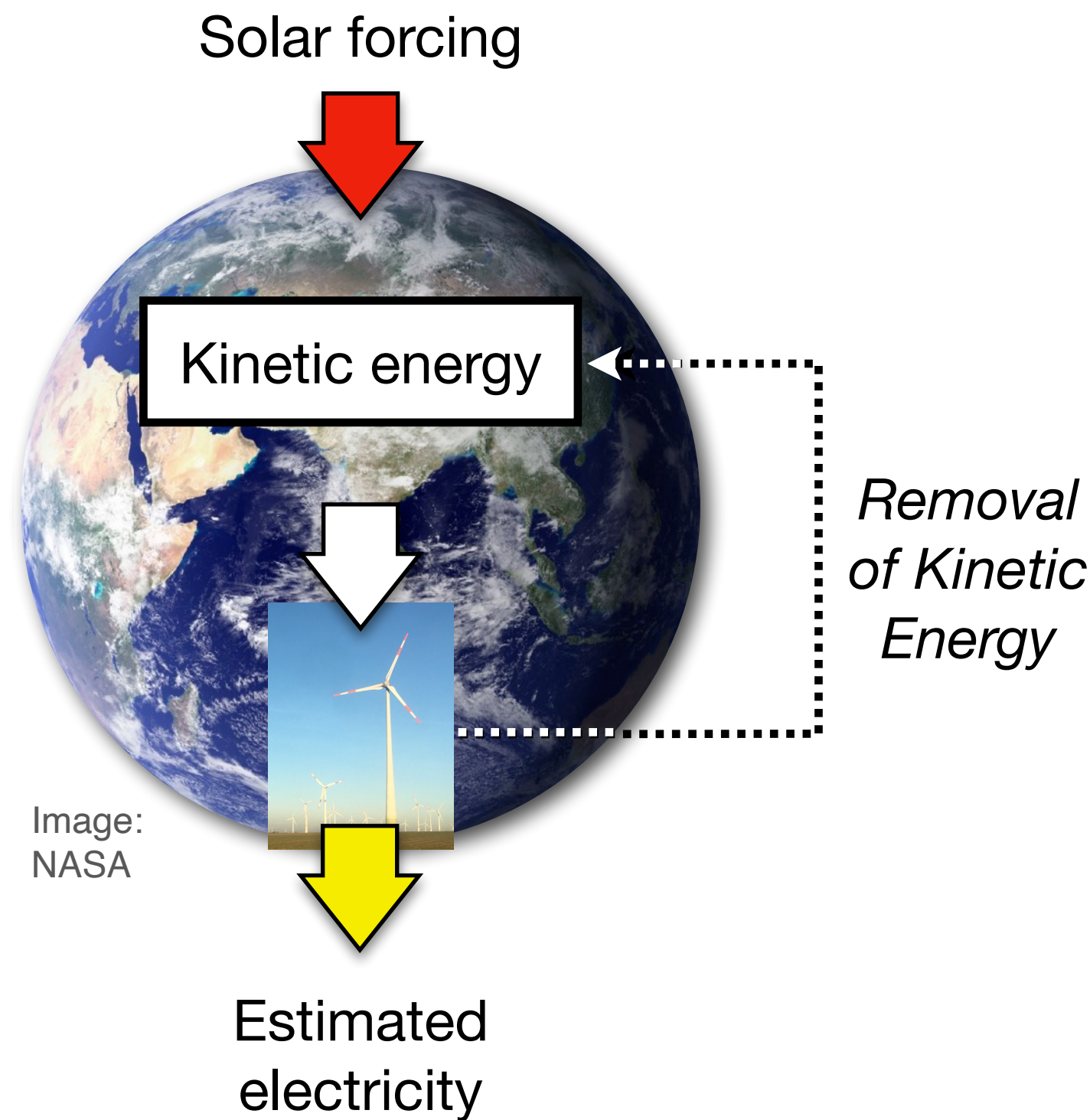
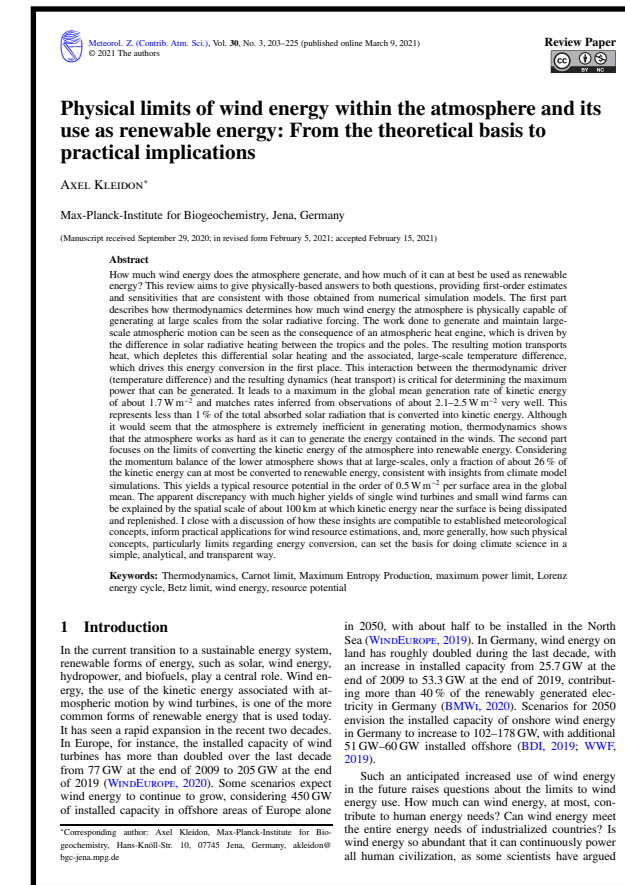


Image: NASA

How and how much wind energy does the atmosphere generate?

How much renewable energy can at best be generated?

What does it imply for the Energiewende?

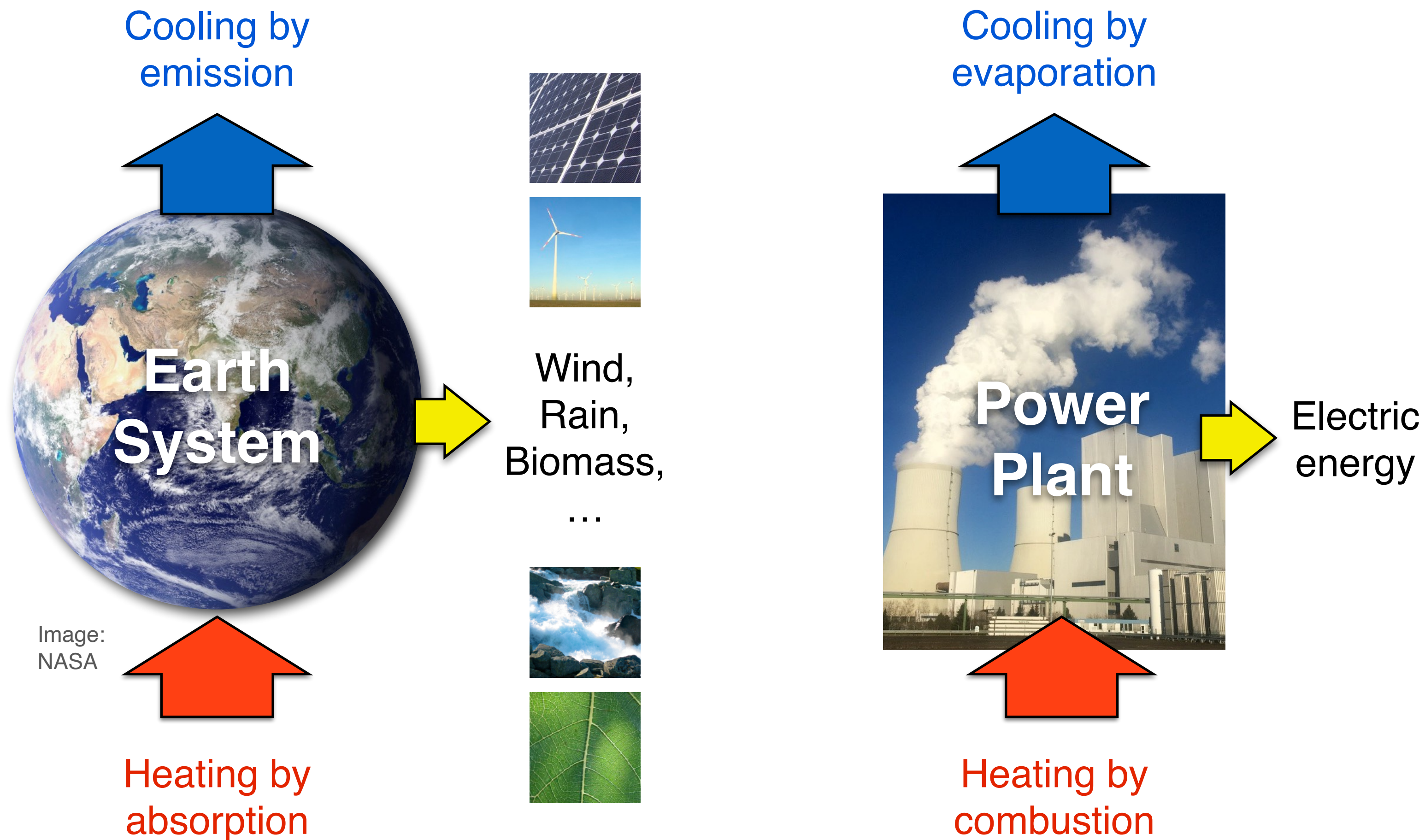


Kleidon (2021)
Meteorologische Zeitschrift



Agora Energiewende et al. (2020)
Project Report

How the Earth System Generates Renewable Energy



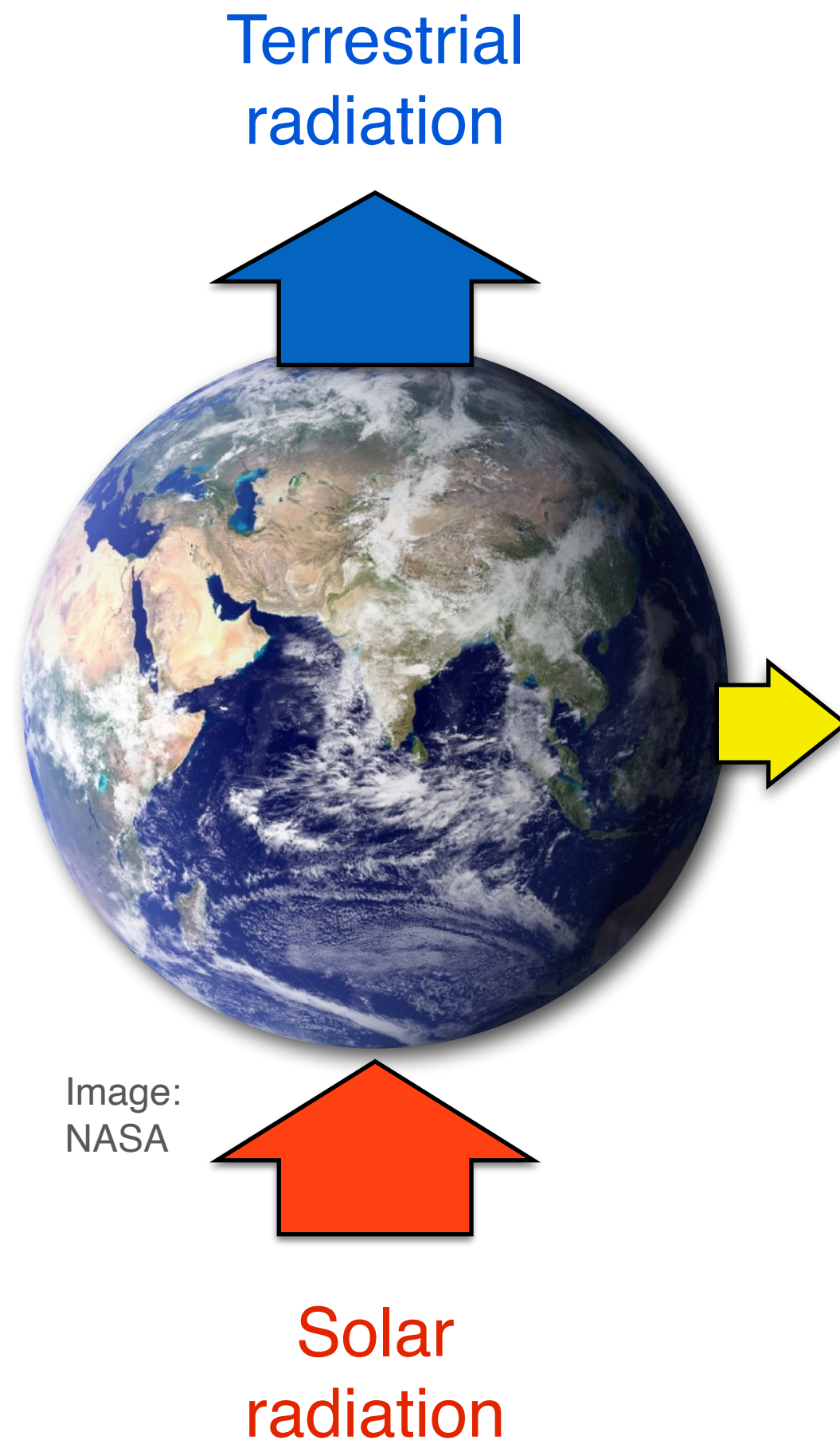
Physical laws
for energy conversion:
(Thermodynamics "beyond heat")

1. Conservation of energy
when converted
2. Dispersal of energy
(increase in entropy)

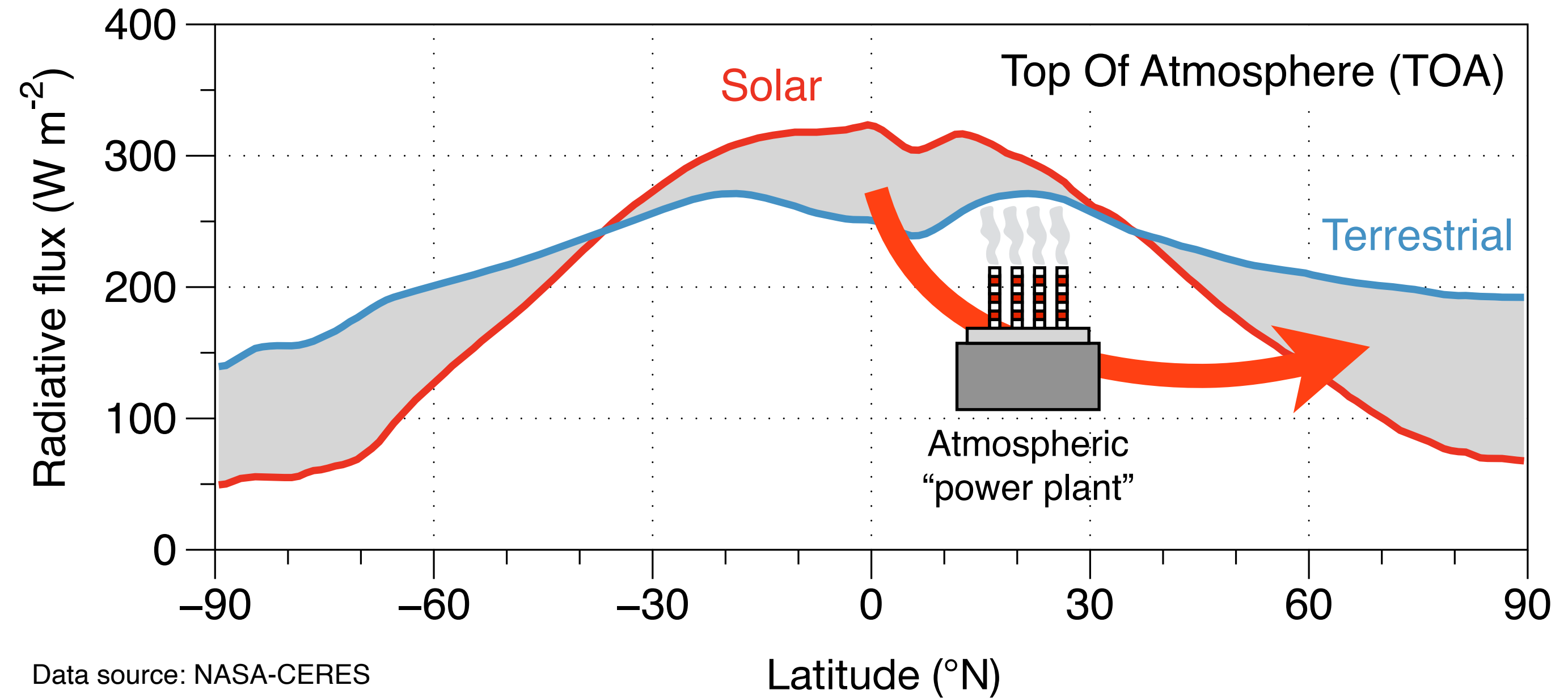
→ Direction

→ Limits ("Carnot")

How the Atmosphere Generates Kinetic Energy



Uneven Heating and Cooling by Radiation
(climatological means)



Solar radiation heats the Earth unevenly (red line), generating temperature differences. The kinetic energy of atmospheric motion is generated out of these differences, distributes heat, and depletes temperature differences. This results in much more even emission to space (blue line).

How the Atmosphere Generates Kinetic Energy

The Carnot limit constrains how much power G can be derived from the heat flux J :

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

Estimating of G from climatological means:

$$J \approx 50 \text{ W m}^{-2}$$

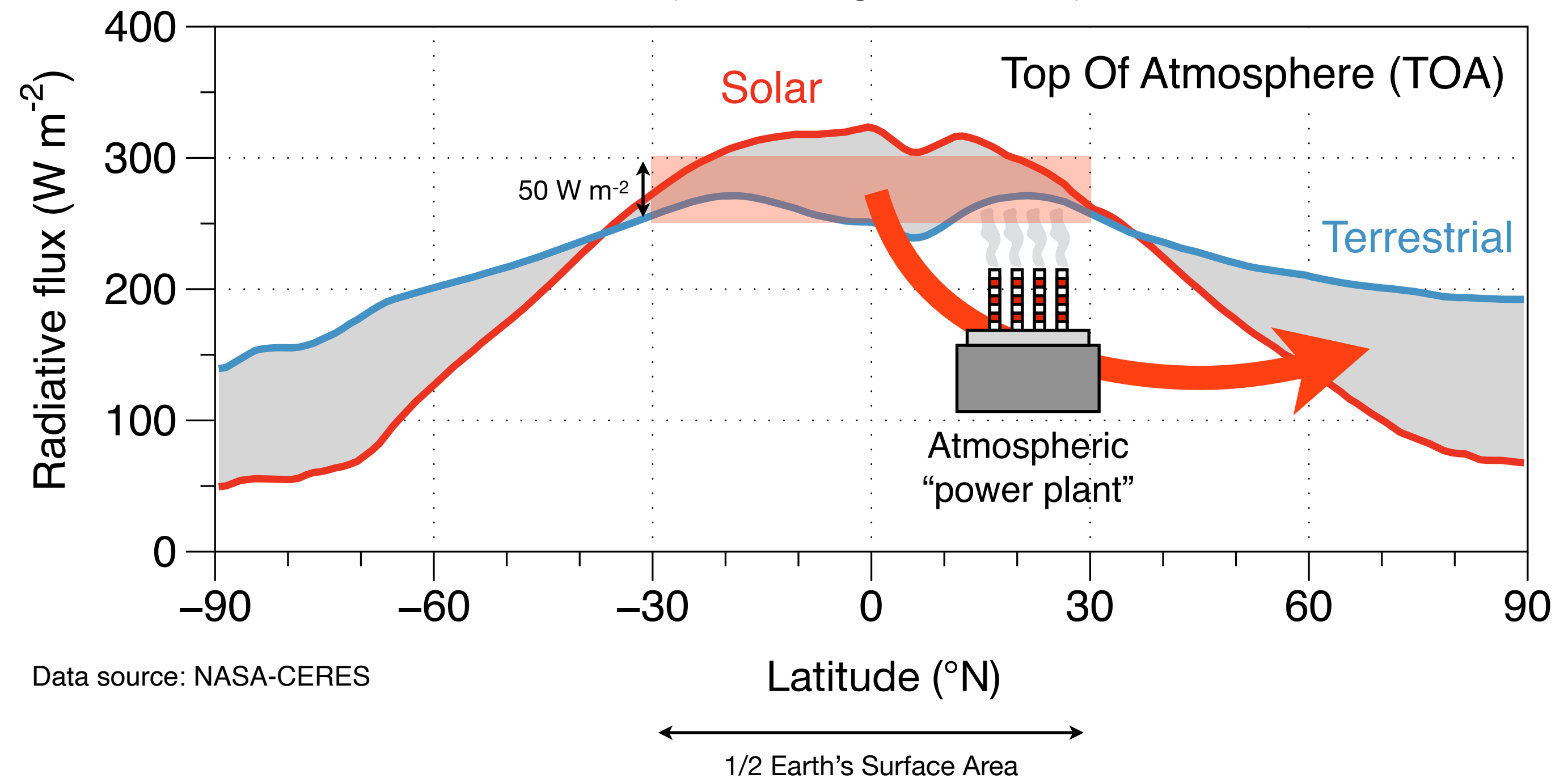
$$\Delta T \approx 30 \text{ K}$$

$$T \approx 300 \text{ K}$$

$$G \approx 1/2 \times 50 \text{ W m}^{-2} \times 10\%$$

$$G \approx 2.5 \text{ W m}^{-2}$$

Uneven Heating and Cooling by Radiation
(climatological means)

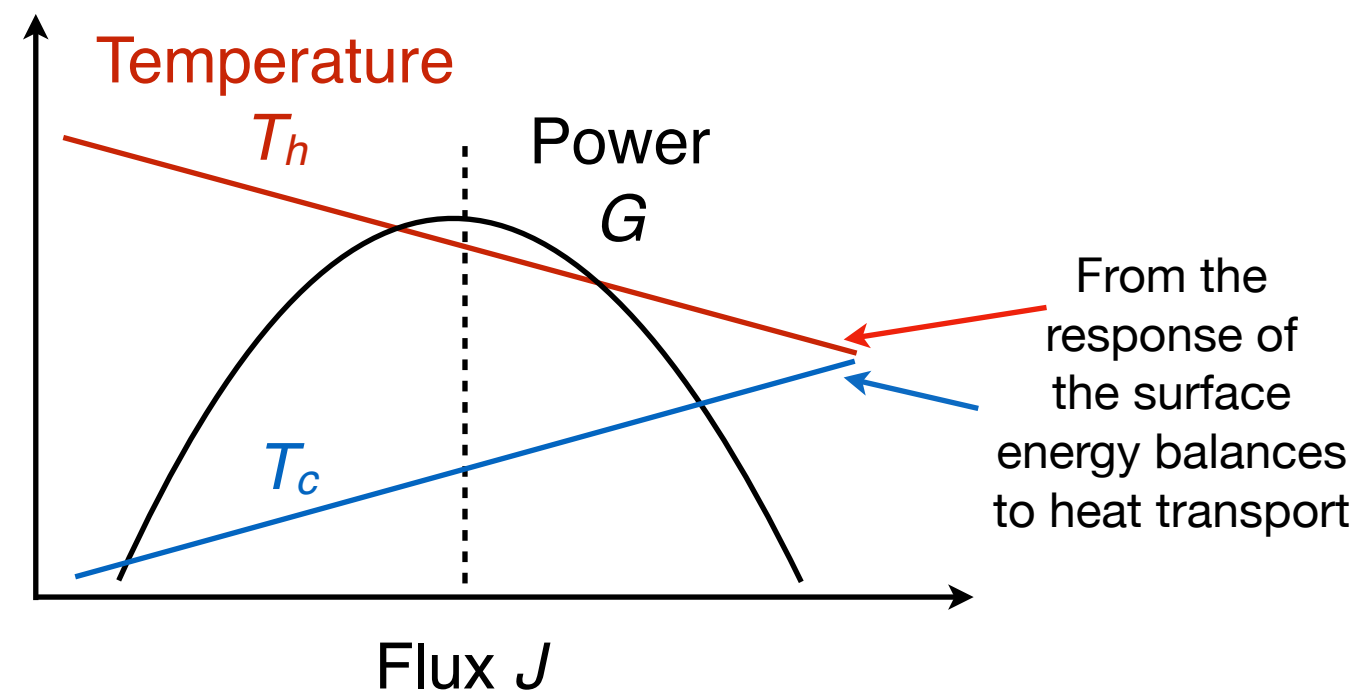


How the Atmosphere Generates Kinetic Energy

The Carnot limit constrains how much power G can be derived from the heat flux J :

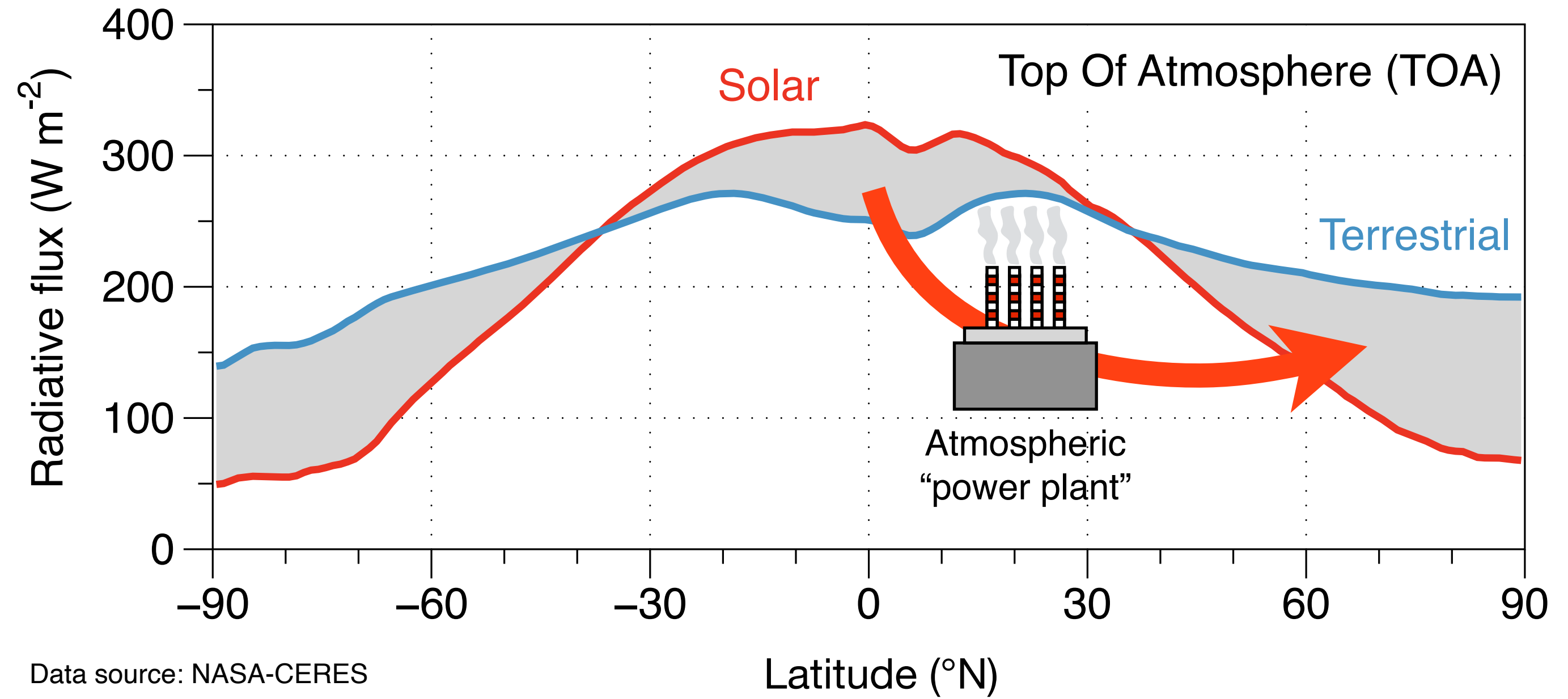
$$G = J \cdot \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

How much could be generated at best?
(Maximum power limit)



$$G \approx 2 \text{ W m}^{-2}$$

Uneven Heating and Cooling by Radiation
(climatological means)



$$\text{Efficiency} \approx 1\%$$

How the Atmosphere Generates Kinetic Energy



Source: wikipedia.org

$$2 \text{ W/m}^2 \times 357\,000 \text{ km}^2 = 714 \text{ GW}$$

$$= 22\,500 \text{ PJ/a}$$

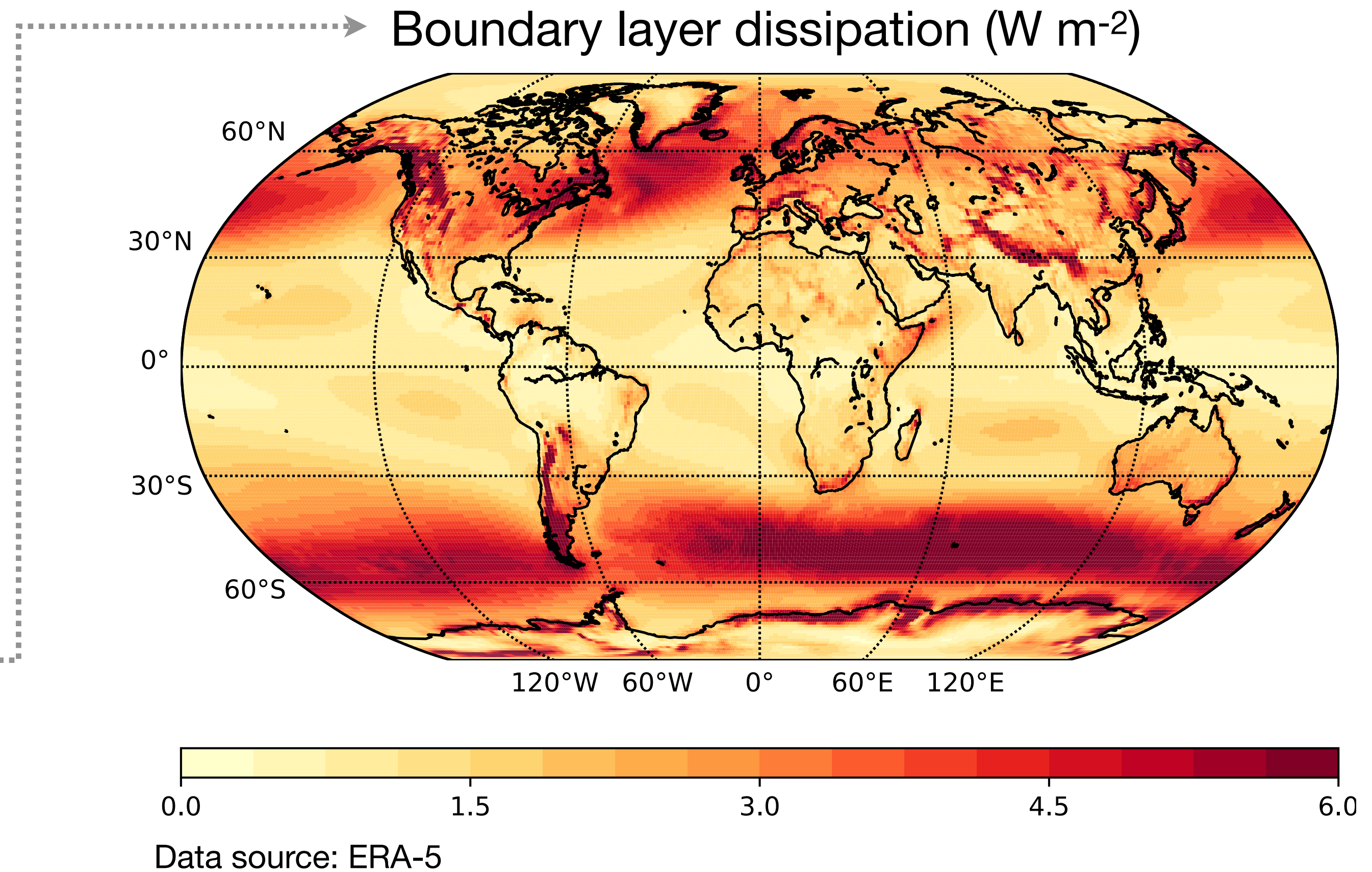
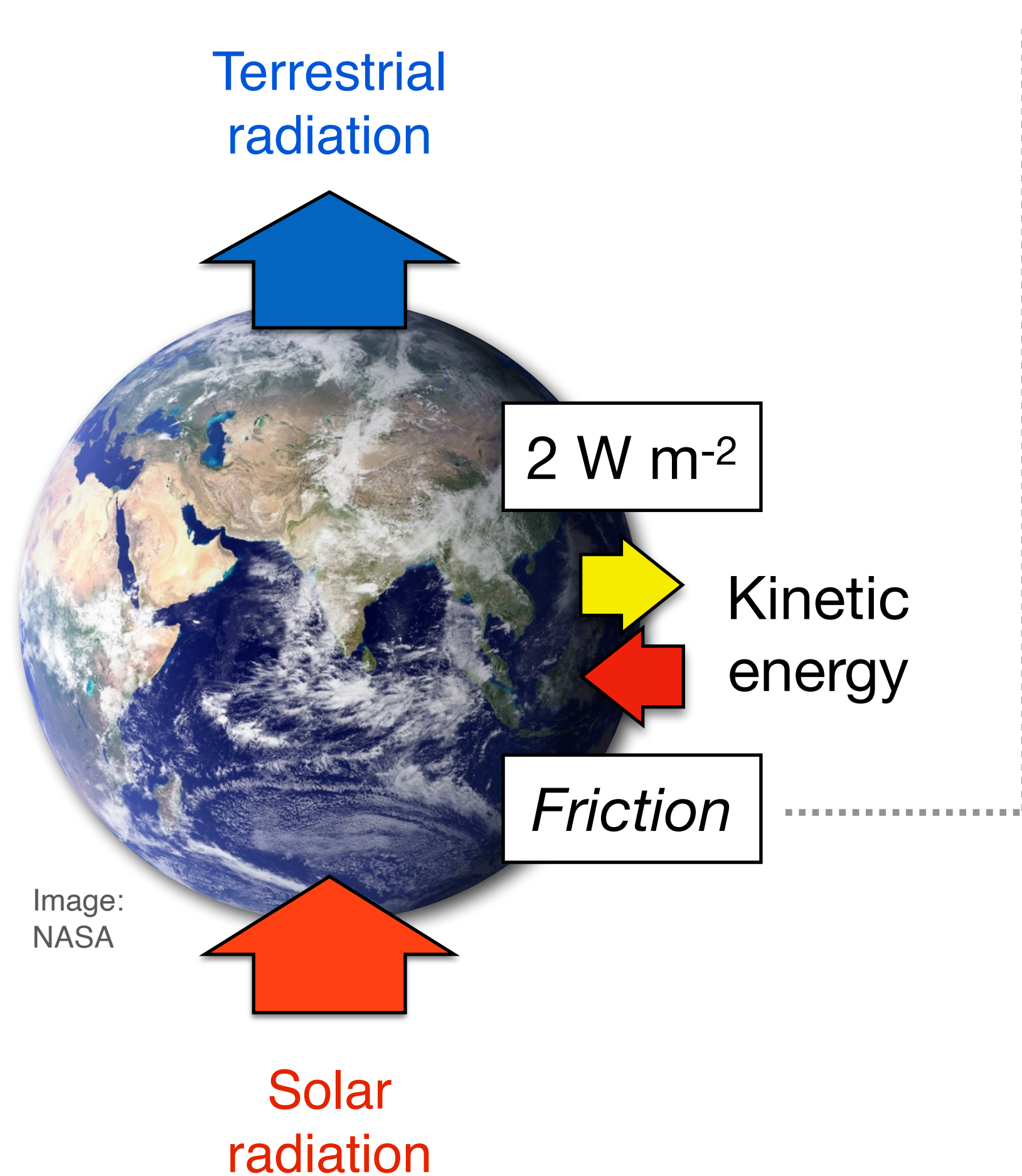
Primary Energy Consumption
(Germany, 2019):

$$= 12\,779 \text{ PJ/a}$$

Source: AG Energiebilanzen

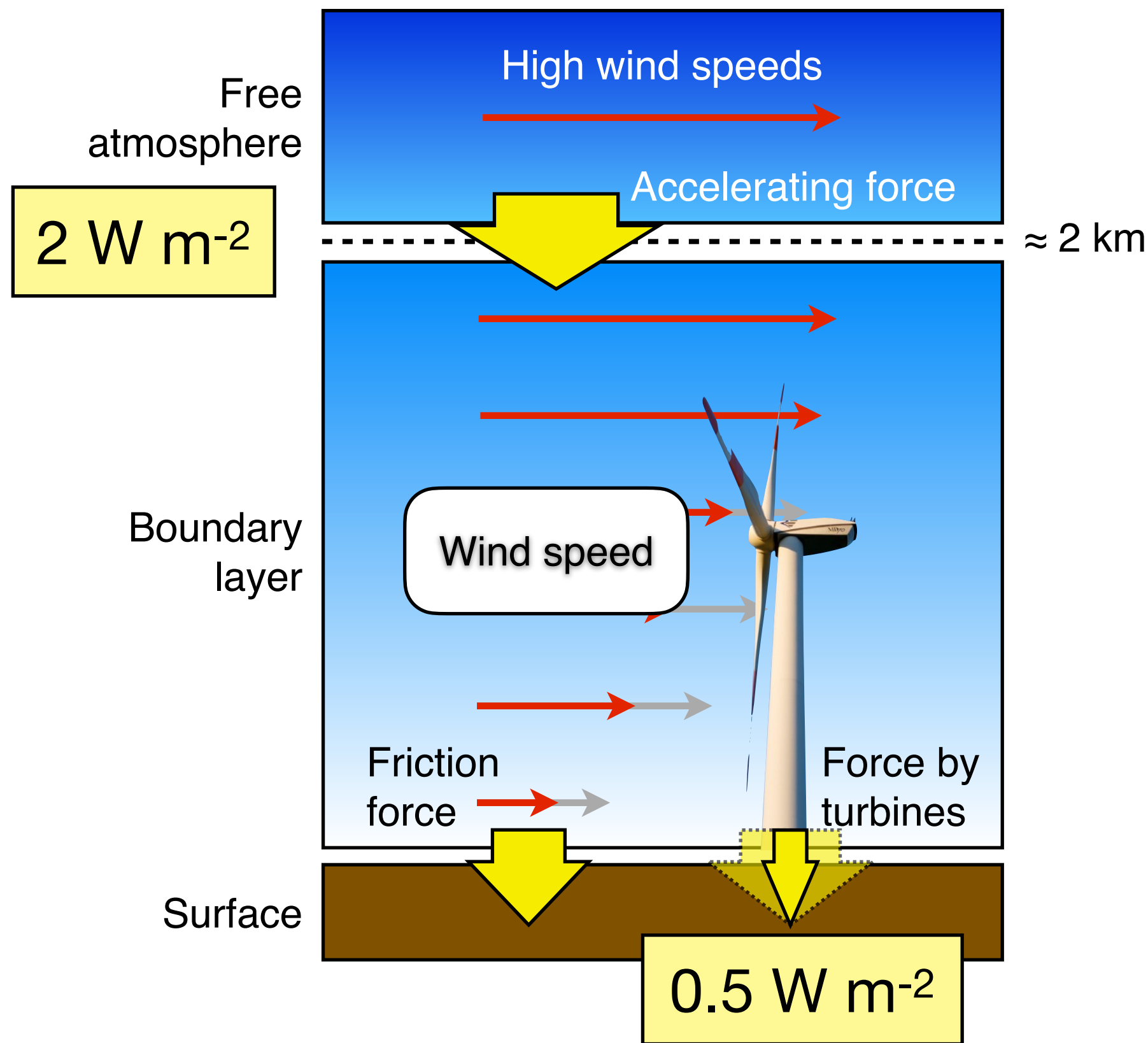
This global-scale estimate suggests that there is not that much wind energy available. But there are more factors that need to be considered.

Large-scale Limits to Wind Energy Use



Generation of kinetic energy in the atmosphere and its dissipation near the surface take place at different places, making it a globally connected system. It implies that wind energy potentials could be larger than 2 W m⁻² at some places (like Germany).

Large-scale Limits to Wind Energy Use



When more wind energy is used by more wind turbines near the surface, wind speeds must decline.

Momentum balance of the boundary layer (“VKE” model):

$$F_{down} = \tau + F_{turbines}$$

Downward momentum transport into the boundary layer Surface stress (“friction”) Drag exerted by wind turbines

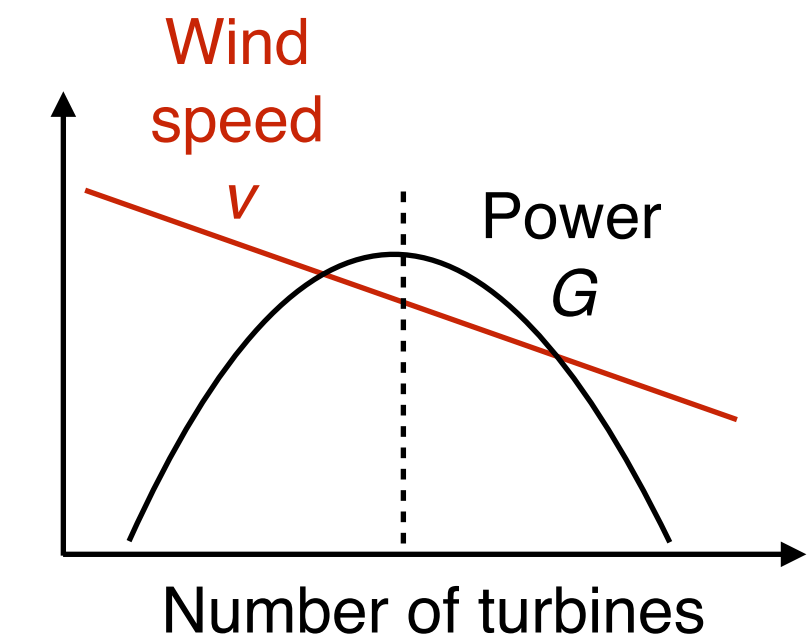
$$\tau = \rho C_d v^2$$

yields:

$$v = \sqrt{\frac{F_{down} - F_{turbines}}{\rho C_d}}$$

Power $G_{turbines}$ removed by wind turbines (generation + wake):

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



Maximum removal by turbines at $\approx 38\%$, of which 1/3 is dissipated in wakes (Corten 2001), and 2/3 used for generation:
=> max. of 26% conversion into electricity

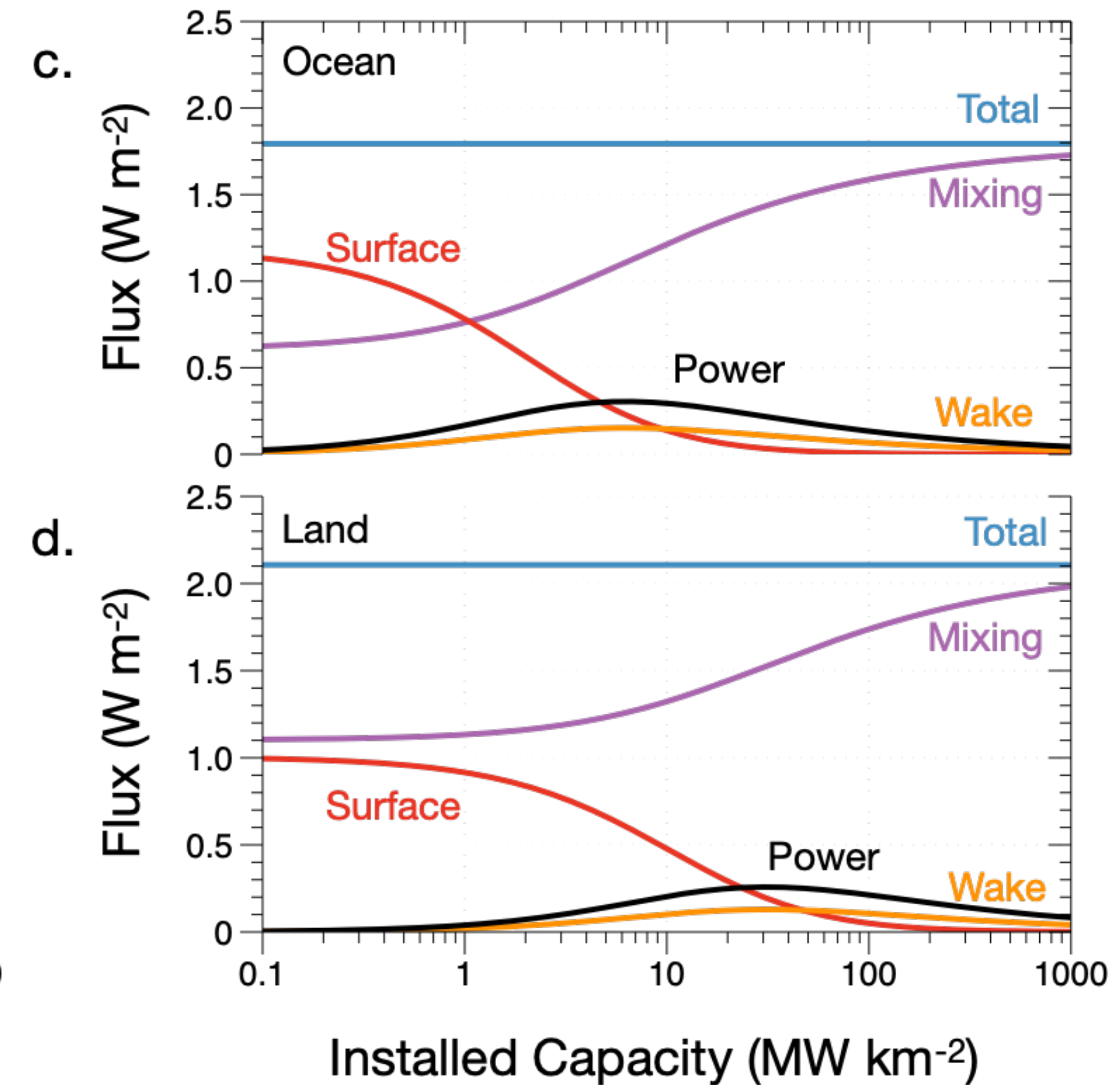
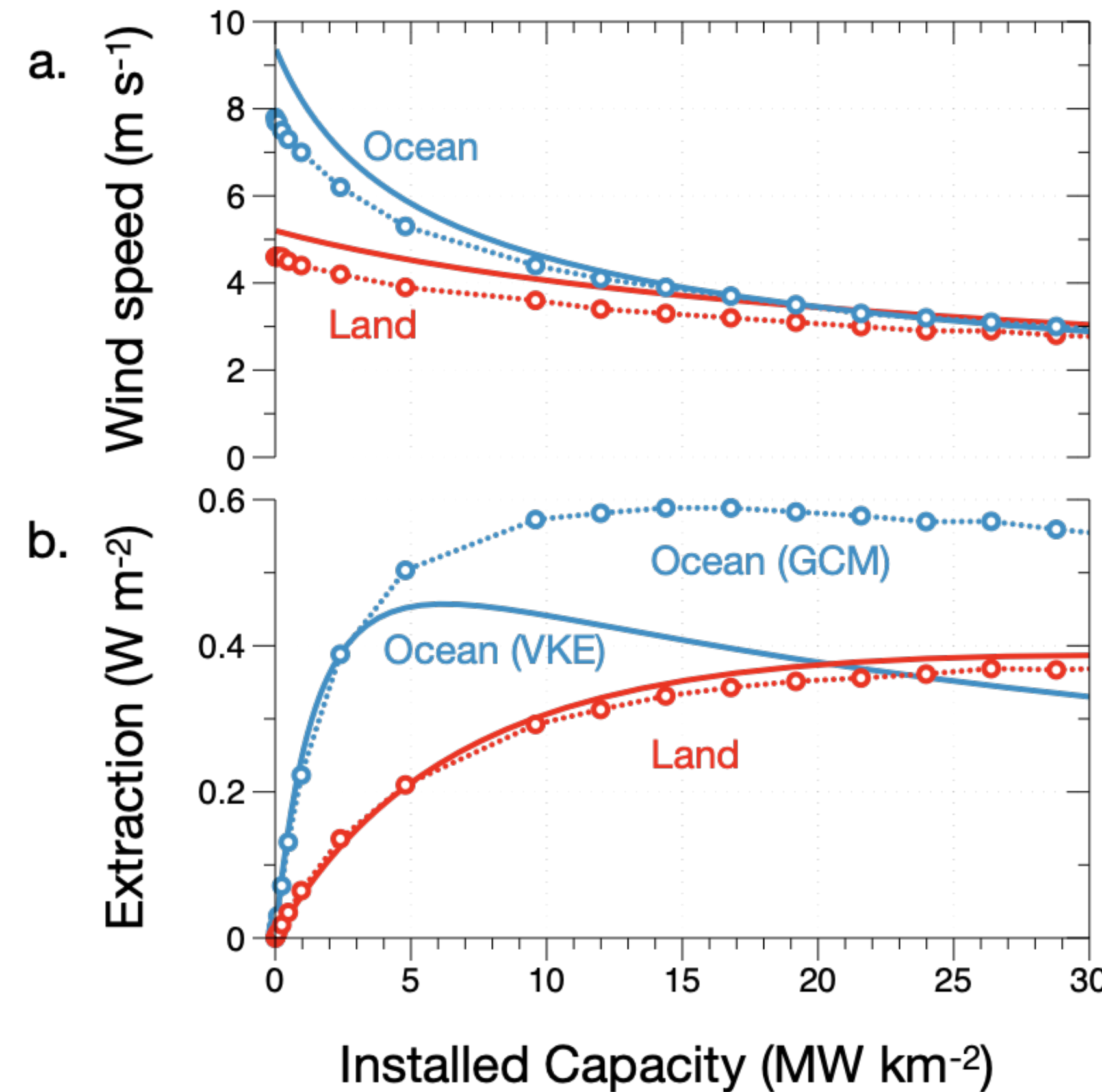
Miller et al (2011) *Earth System Dynamics*
Miller and Kleidon (2016) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*
Kleidon (2021) *Meteorologische Zeitschrift*

Large-scale Limits to Wind Energy Use

Hypothetical estimates of global-scale wind energy use simulated by:

A climate model (GCM, circles, dotted lines)

A momentum balance model (VKE, solid lines)



Large-scale Limits to Wind Energy Use

Reduced wind speeds explain discrepancy between **observation-based** and **model-based** estimates.

Estimate (land + ocean)	Installed Capacity	Wind Speed	Reduction	Electricity Generation	
	MW _i km ⁻²	m s ⁻¹	%	TW _e	W _e m ⁻²
Jacobson & Delucchi (2011)	-	7.0	-	1700	3.33
Jacobson & Archer (2012)	11.3	8.1	-	1750	3.43
VKE (Miller & Kleidon 2016)	n/a	7.0	-42 %	302	0.59
GCM (Miller & Kleidon 2016)	10.6	7.0	-48 %	270	0.53
Jacobson & Archer (2012)	11.3	8.1	-51 %	224	0.44
Marvel et al. (2012)	-	9.0	-30 %	282	0.55

Previous global-scale estimates that used **observed wind speeds** substantially overestimate the resource potential compared to **climate models**, because they do not account for the atmospheric response!

The atmospheric response can be described in relatively simple terms.

→ Large-scale limit $\approx 0.5 \text{ W m}^{-2}$,
(notably less than 2 W m^{-2} or more)

→ More wind energy use,
Lower wind speeds,
Lower turbine efficiencies!

Miller and Kleidon (2016) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*

Impacts on German Energy Scenarios



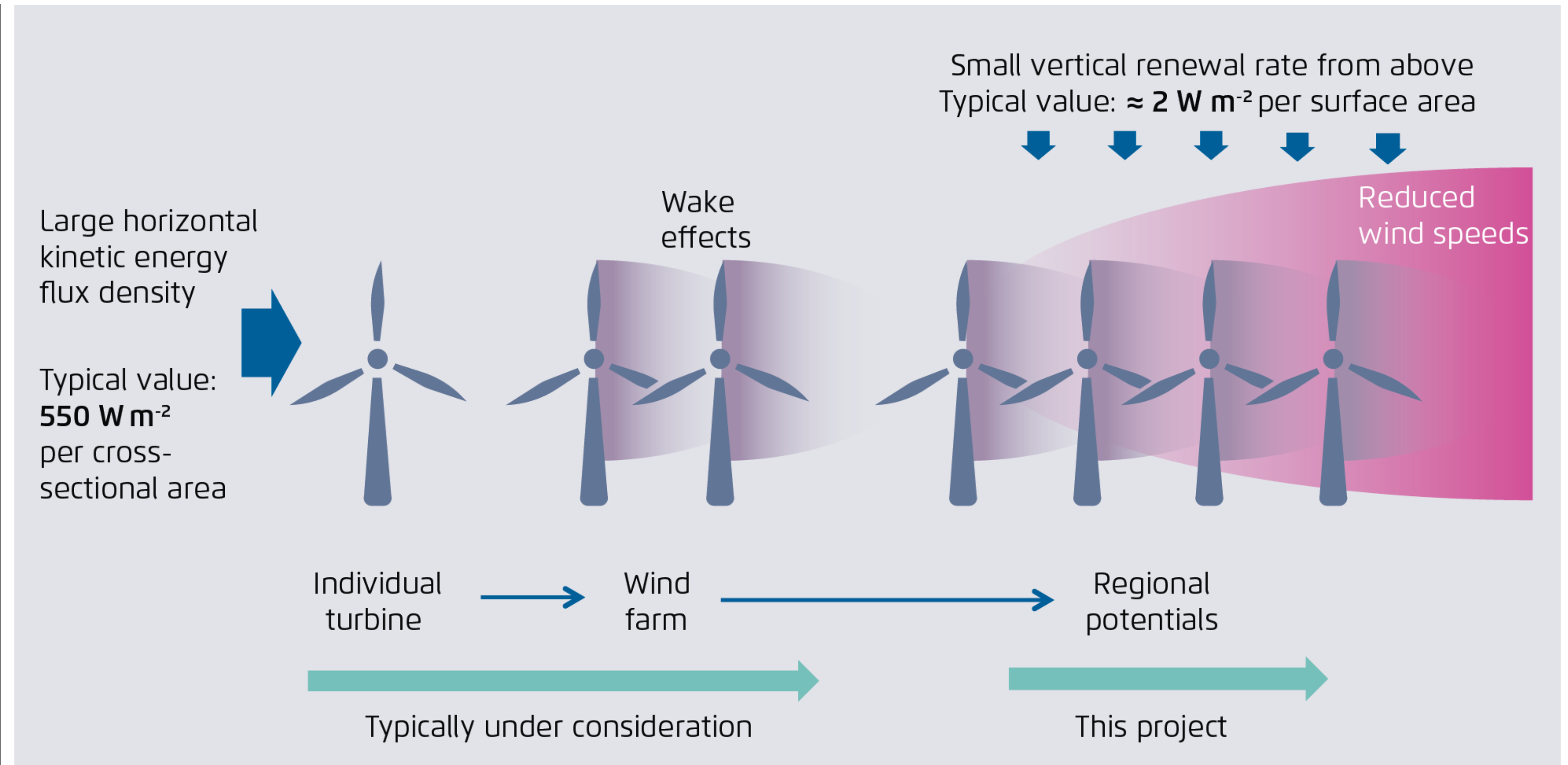

Making the Most of Offshore Wind
 Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea
 STUDY





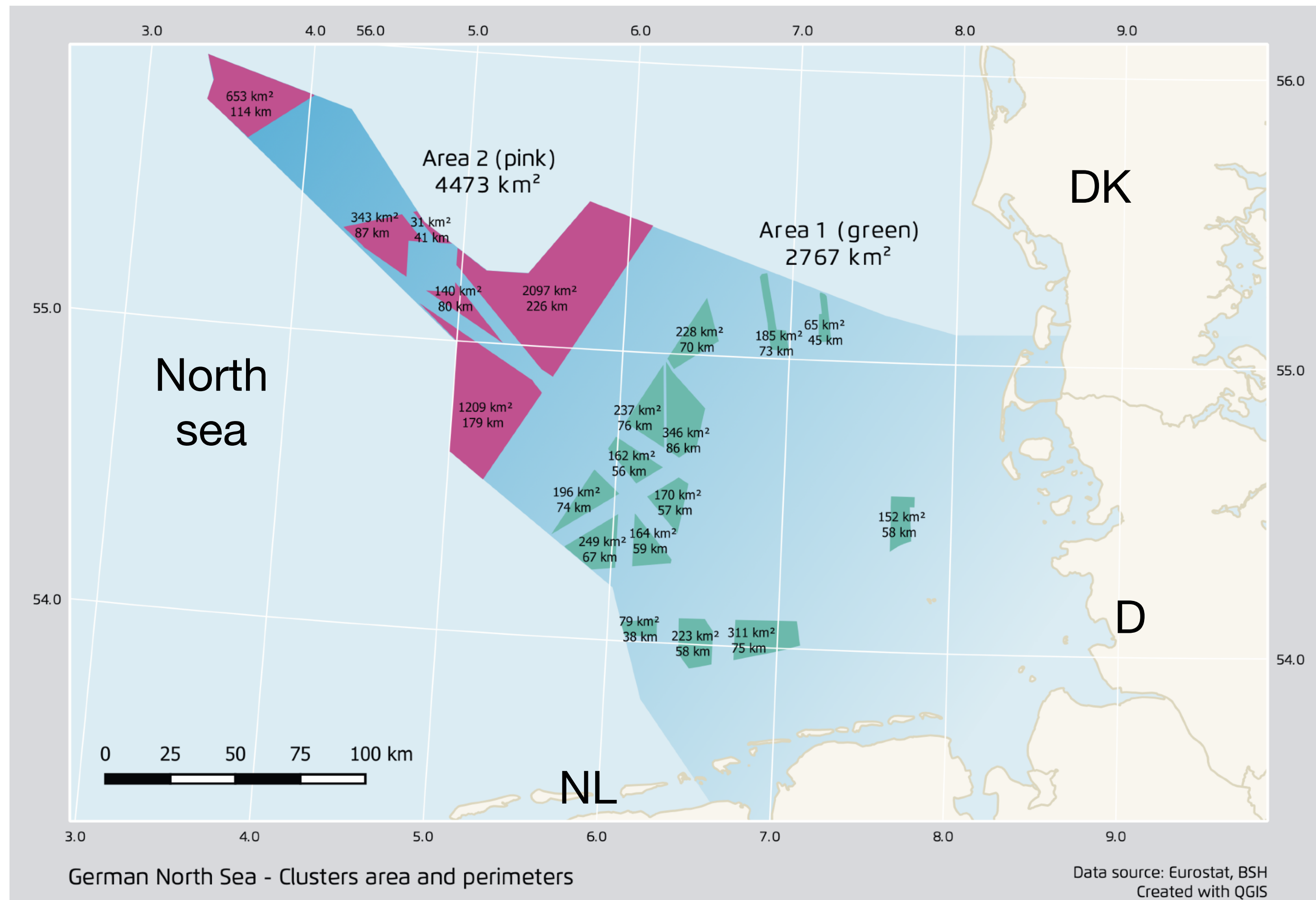

Joint project with Matthias Deutsch (AE),
 Jake Badger (DTU), Axel Kleidon (MPI) & Co

Agora Energiewende et al. (2020)



Project goal: Estimate offshore wind resource potential of the North sea in the context of German renewable energy scenarios which include the removal effect of wind turbines.

Impacts on German Energy Scenarios

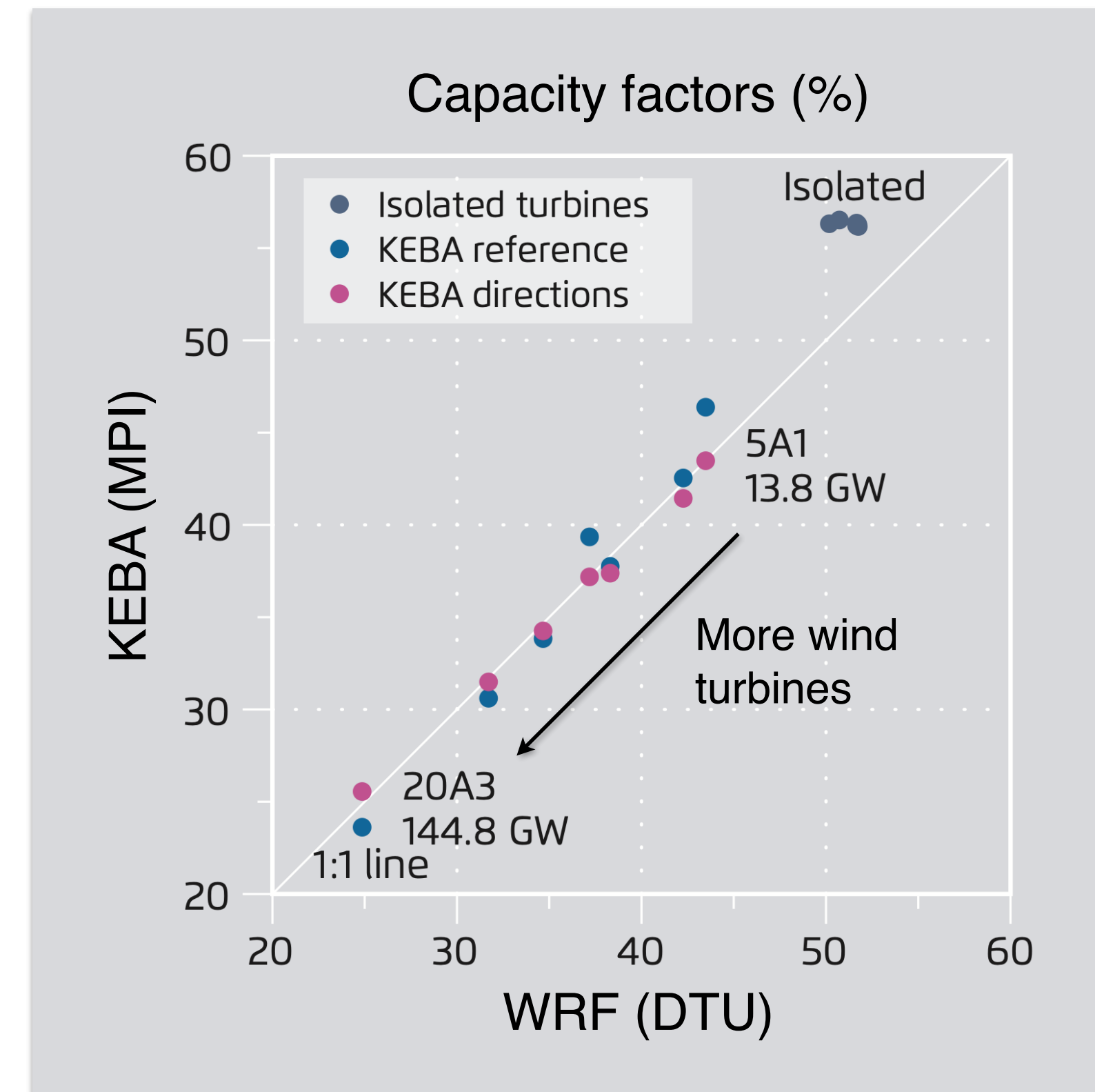
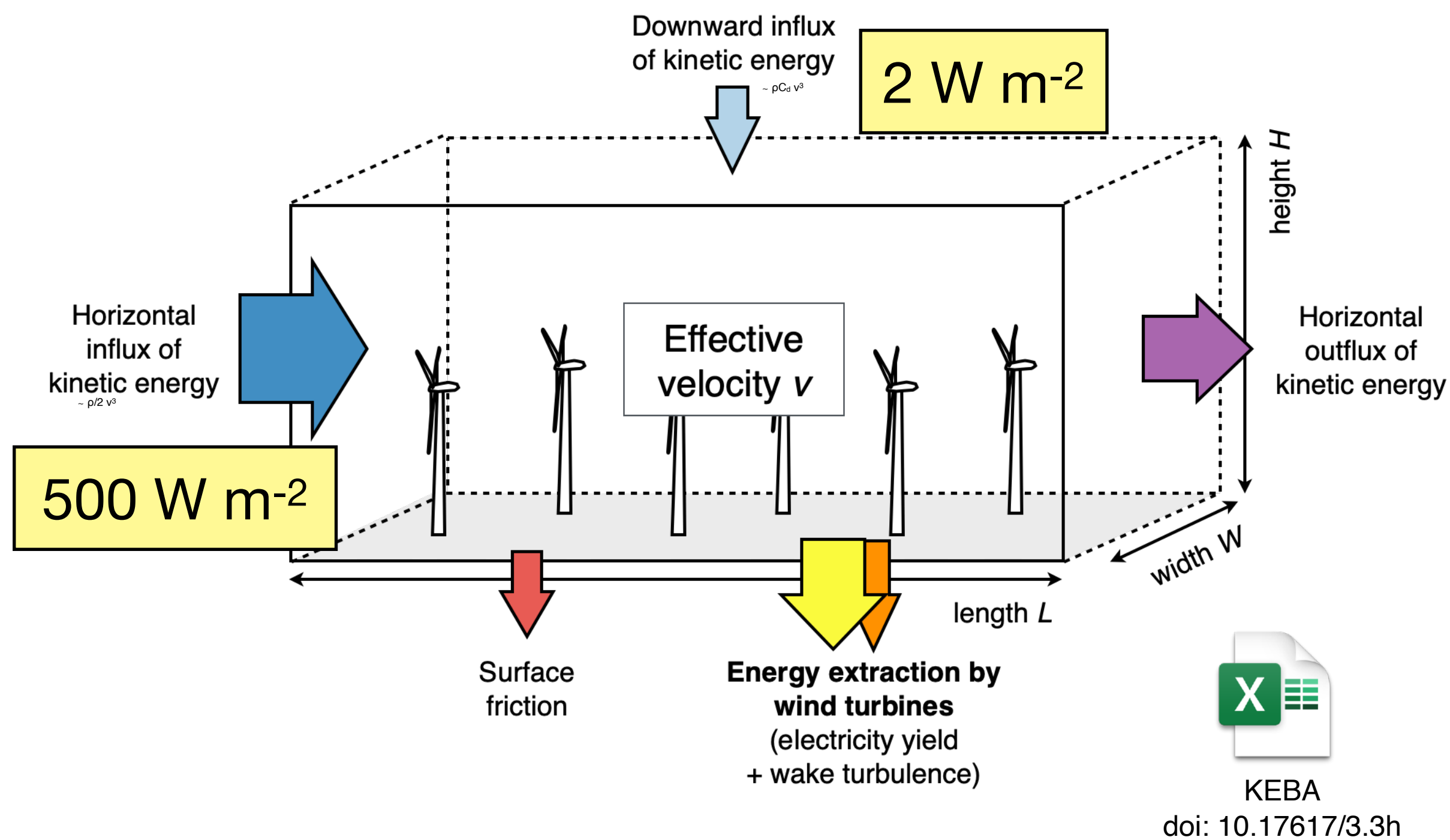


- Focus on German EEZ in the German Bight
- Consideration of three areas: A1, A2, and both areas (A3)
- Use of different installed capacity densities (5, 7.5, 10, 12.5, 20 MW/km²)
- Power curve of a hypothetical 12 MW turbine
- Scenarios ranging from 13.8 to 144.8 GW (45 - 70 GW anticipated in scenarios)
- Current development focuses on Area 1
- Two estimation methods:
 - KEBA: Kinetic Energy Balance of the Atmosphere (Excel spreadsheet)
 - WRF: Weather Research and Forecasting model (supercomputer)

Agora Energiewende et al. (2020)

Impacts on German Energy Scenarios

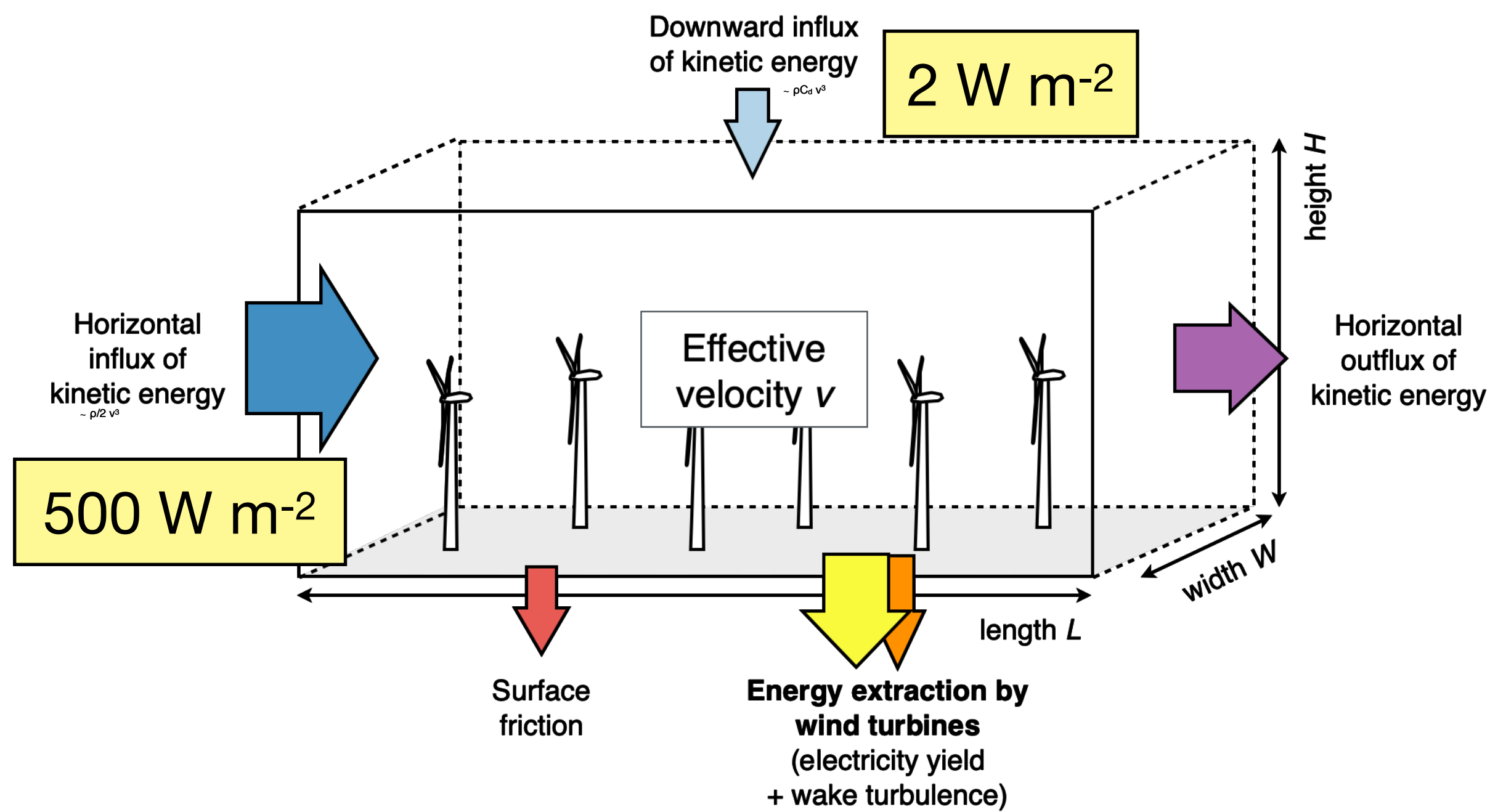
Kinetic Energy Balance of the Atmosphere (KEBA):



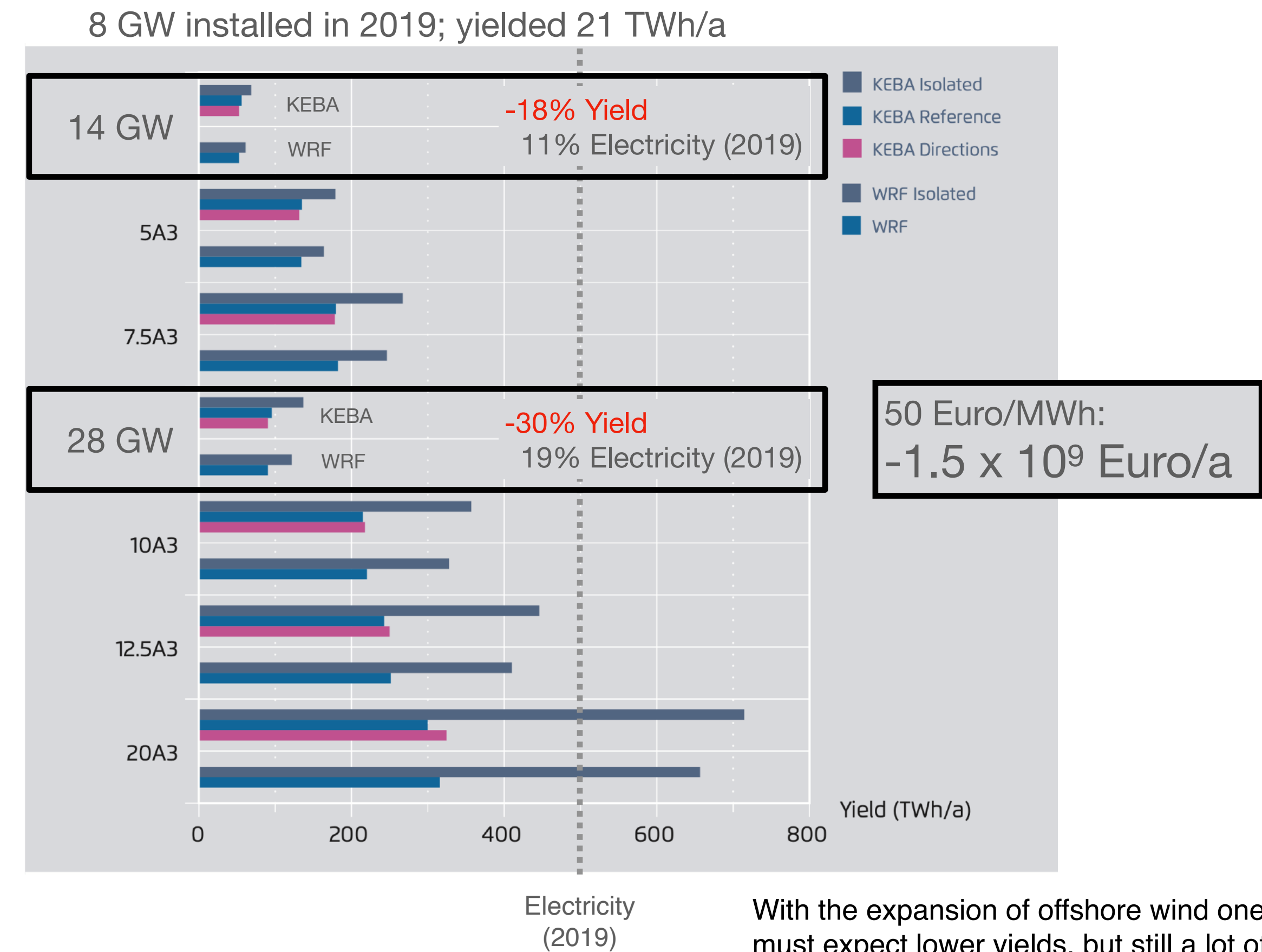
More wind turbines result in lower wind speeds, reducing mean capacity factors (ratio of generated electricity to turbine capacity).

Impacts on German Energy Scenarios

Kinetic Energy Balance of the Atmosphere (KEBA):



Estimated yields (in TWh/a):



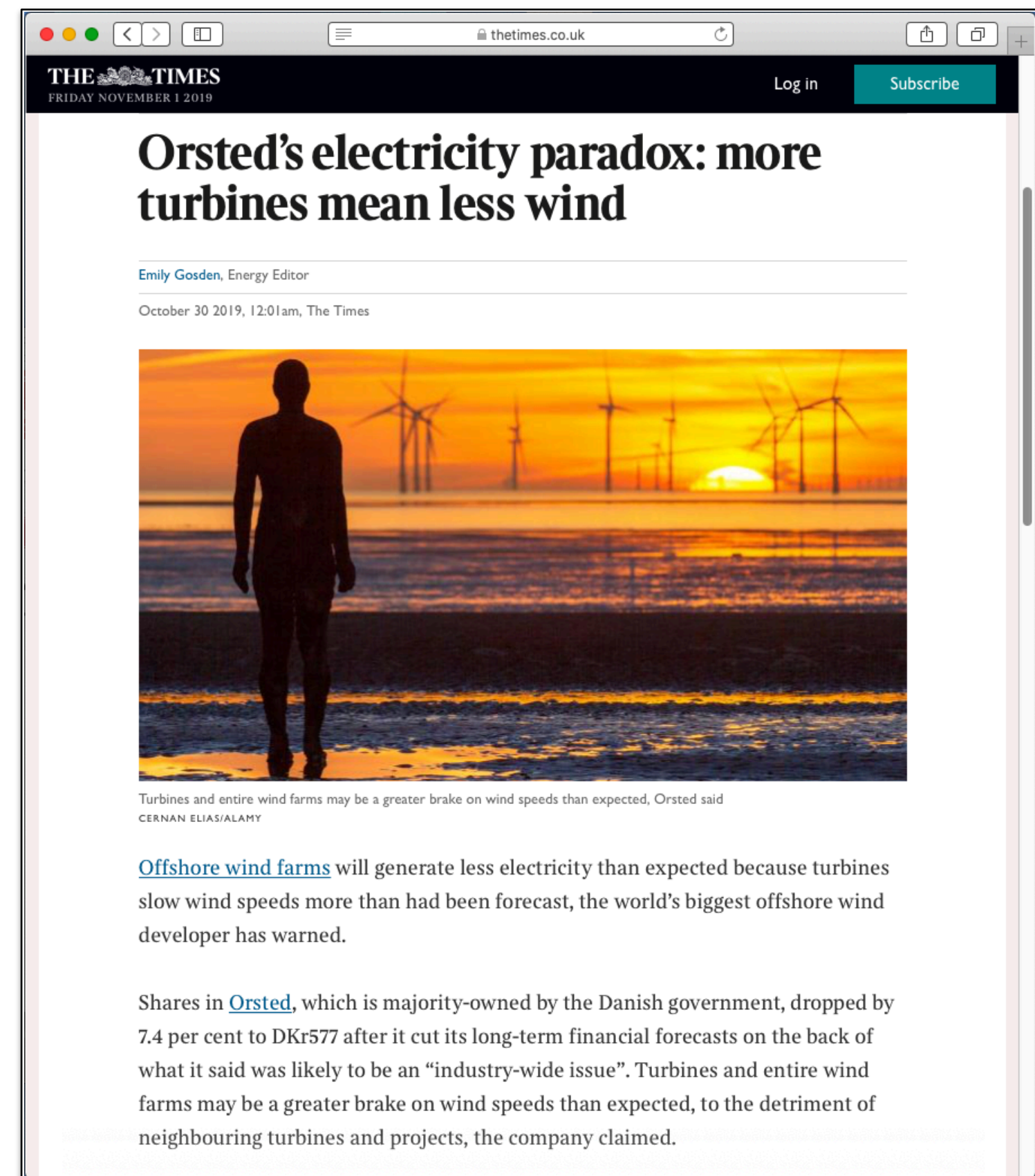
Agora Energiewende et al. (2020)

With the expansion of offshore wind one must expect lower yields, but still a lot of electricity can be generated.

Kleidon and Miller (2020) *Geoscientific Model Development*

Further impacts

Offshore developer lowers expectations...



The Times, 30 Oct 2019

More space for offshore being considered, and lower capacity factors...

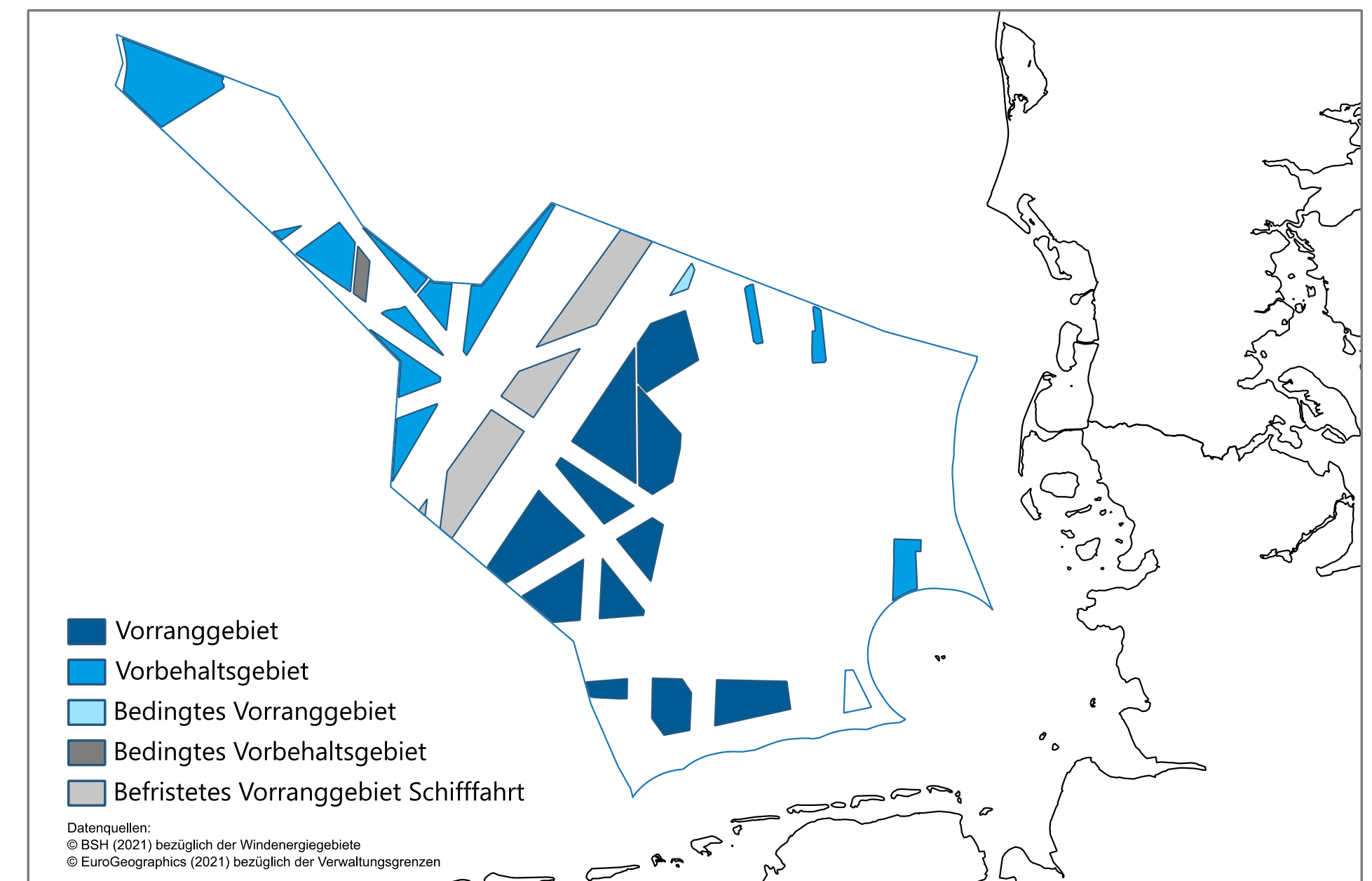


Abbildung 4:
Mögliche Windenergiegebiete in der AWZ der Nordsee

Deutsche Windguard, "Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Windenergie auf See", Sep 2021



Limits to wind energy: Summary and Implications

Large-scale generation of atmospheric motion limited to 2 W m^{-2} .

Only 1% of absorbed solar radiation is converted to kinetic energy in the atmosphere, but the atmosphere works as hard as it can!

Availability of kinetic energy near the surface is highly variable.

Large differences in frictional dissipation make some regions more suitable for wind energy use, such as Germany.

Large scales: < 26% of the kinetic energy can be used.

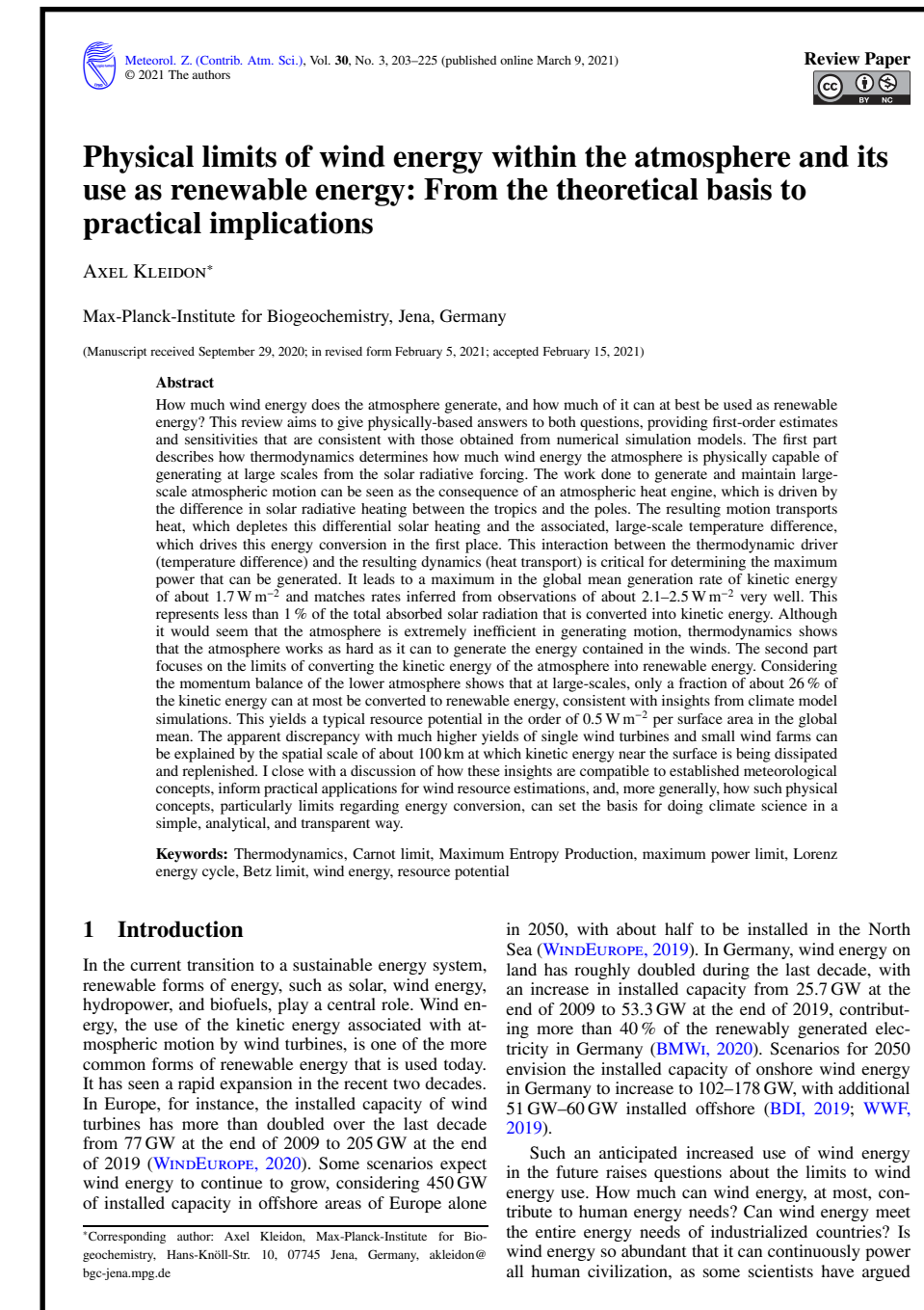
More wind turbines reduce wind speeds and lower turbine efficiencies.

Atmospheric effects lower yields with the expansion of offshore wind power in the German Bight.

Higher yields possible at regional scale because of additional contribution by horizontal flow. Yields in offshore scenarios for Germany 2050 are notably reduced.

Important to differentiate!

Limited potential of wind power, but still a lot of electricity can be generated.



Kleidon (2021)
Meteorologische Zeitschrift
doi:10.1127/metz/2021/1062



Agora Energiewende
“Offshore Wind Potential”
www.agora-energiewende.de

Wind Energy and Climate Impacts



Source: wikipedia.org

$$2 \text{ W/m}^2 \times 357\,000 \text{ km}^2 = 714 \text{ GW}$$

$$= 22\,500 \text{ PJ/a}$$

$$= 6\,250 \text{ TWh/a}$$

Electricity generation (2019) = 580 TWh/a
Wind (onshore, 2019) = **100 TWh/a**

Source: AG Energiebilanzen

- Current wind energy use is $\approx 6\%$ of its maximum ($100/0.26 \times 6250$).
- Impacts on atmosphere very likely to be small and local, because
 - i) small magnitude
 - ii) kinetic energy is dissipated near the surface anyway.

Literatur auf Deutsch

DOI: 10.1002/piuz.201201294



Thermodynamik des Erdsystems Was leistet die Erde?

AXEL KLEIDON

Wie prägend die Spuren der Menschheit auf der Erde sind, zeigt die Nachtaufnahme von Italien aus der Internationalen Raumstation ISS (Foto: ESA).

Die kontinuierliche Verrichtung von Arbeit hält die Dynamik des Erdsystems in Gang. Aber wie wird diese Leistung aus den natürlichen Energiequellen gewonnen? Und was sind ihre physikalischen Grenzen? Diese Fragen eröffnen einen neuen Blick auf die Funktionsweise des Erdsystems, die Rolle des Lebens als „Antrieb“ und die Stärke des menschlichen Einflusses. Die Antworten zeigen zudem, dass manche erneuerbare Energiequellen engere natürliche Grenzen in ihrer nachhaltigen Nutzung haben als andere.

Stellen wir uns vor, dass die natürlichen Prozesse im System Erde streiken und keine Arbeit mehr verrichten. Was würde passieren? Der Wind würde durch Reibung zum Erliegen kommen, das Wasser würde den Berg herab fließen und trockenes Land hinterlassen, die Biomasse würde abgebaut werden zu Kohlendioxid. Die Dynamik würde zum Stillstand kommen, kein Wasser würde mehr von der Atmosphäre zum Land transportiert werden. Es wäre kein Leben vorstellbar und damit auch keine Lebensgrundlage für die Menschheit.

Dieses Gedankenexperiment veranschaulicht, wie zentral Leistung, die kontinuierliche Verrichtung von Arbeit, für die Erhaltung der Dynamik des Erdsystems ist. Aber woraus gewinnt die Erde Leistung auf planetarer Skala? Was bestimmt die Obergrenzen und wie viel Leistung wird für welche natürlichen Prozesse genutzt? Die Beantwortung dieser Fragen ermöglicht nicht nur eine fundamentale Betrachtung von Grenzen und Zusammenhängen von Prozessen im Erdsystem. Sie erlaubt es auch, die Rolle des Menschen im Erdsystem besser zu verstehen und nachhaltig gestalten zu können.

Letztendlich wird menschliche Aktivität angetrieben durch den Verbrauch an freier Energie. Zum einen ist es chemische freie Energie aus der landwirtschaftlichen Nutzung der Biosphäre, zum anderen die Nutzung freier Energie für industrielle Prozesse. Wenn wir in Zukunft erneuerbare Energiequellen nachhaltig einsetzen wollen, um unseren Primärenergieverbrauch zu befriedigen, so wird dies zu Lasten des Erdsystems und seiner Dynamik passieren. Die Leistung von Erdsystemprozessen und ihre Grenzen sind daher nicht allein für die Grundlagenforschung interessant, sondern setzen auch den Rahmen für die Planung einer nachhaltigen Zukunft.

Die Leistung des Gesamtsystems Erde und seiner Prozesse werde ich im Folgenden aus der Sicht der Thermodynamik analysieren [1, 2]. Letztendlich entstehen alle Kräfte aus thermodynamischen Antrieben. Damit folgt die resultierende Dynamik des Erdsystems den Hauptsätzen der Thermodynamik, insbesondere in die Richtung von Zuständen höherer Entropie. Diese ist durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik vorgegeben (siehe „Der zweite Hauptsatz im Erdsystem“ auf S. 139).

Antrieb planetarer Wärmekraftmaschinen

Wir betrachten nun das System Erde als planetare Wärmekraftmaschine. Sie erzeugt Leistung, überträgt diese auf die verschiedenen Prozesse im Erdsystem und hält sie so am Laufen. Dazu schätzen wir zunächst mit Hilfe der Thermodynamik ab, wie viel Leistung aus den planetaren Antrieben maximal gewonnen werden kann. Das Konzept der Wärmekraftmaschine in der Thermodynamik erklärt, wie man aus Wärme Arbeit gewinnen kann. Diese Arbeit ist notwendig, um Bewegung zu erhalten, um Masse zu heben oder Materie umzuwandeln, zum Beispiel durch Phasenübergänge oder chemische Reaktionen. Diese allgemeine Grundlage trifft auch auf die natürlichen Prozesse im Erdsystem zu, die für die Bewegung von Luft in der Atmosphäre, von Wasser in Flüssen und Ozeanen und vom Gestein im Erdinneren sorgen. Sie gilt auch für die chemischen Umwandlungsprozesse in den geochemischen Kreisläufen von Wasser, Kohlenstoff und anderen Elementen.

Die Thermodynamik setzt hierbei die Grenzen für die maximale Leistung, die aus den Antrieben gewonnen werden

136 | Phys. Unserer Zeit | 3/2012 (43) | Online-Ausgabe unter: wileyonlinelibrary.com | © 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Kleidon (2012)
Physik in unserer Zeit
doi: 10.1002/piuz.201201294

DOI: 10.1002/piuz.201901540

Erneuerbare Energiequellen und ihre Grenzen in Deutschland Sonne statt Flaute

AXEL KLEIDON

Erneuerbare Energie trägt inzwischen substantiell zur Stromerzeugung in Deutschland bei. Aber wie sieht es mit dem zukünftigen Ausbau aus, wenn wir vollständig unseren Energiebedarf durch erneuerbare Energiequellen decken wollen? Werden wir an natürliche Grenzen stoßen?

Dennoch wird für eine vollständige Energiewende noch erheblich mehr erneuerbare Energie benötigt als gegenwärtig in Deutschland erzeugt wird. Zwangsläufig stellt sich dabei die Frage, ob es Grenzen in der Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Deutschland gibt und wo diese liegen. Wieviel Wind- und Solarenergie kann man in Deutschland maximal nutzen? Kann die Geothermie substantiell zur Energieversorgung beitragen? Solche Fragen haben entscheidenden Einfluss auf Zukunftsszenarien für die weitere Energiewende in Deutschland.

Dieser Artikel soll einen Beitrag zu dieser Diskussion leisten. Dazu bringt er einfache, physikbasierte Abschätzungen von verschiedenen Energieformen und stellt sie in den Zusammenhang mit möglichen Zukunftsszenarien. Als eine Folge werden wir sehen, dass die Solarenergie eine deutlich wichtigere Rolle spielen wird als alle anderen erneuerbaren Energieformen zusammen. Als ersten Schritt in dieser Betrachtung schauen wir uns an, wie verschiedene Formen von erneuerbarer Energie von der Erde selbst erzeugt werden.

Grundsätzliches


Die Technologien des Erneuerbare-Energie-Sektors nutzen Formen von Energie des Erdsystems, die durch natürliche Prozesse kontinuierlich neu erzeugt werden. Der Begriff „erneuerbar“ mag für Physikerinnen und Physiker nach wie vor befremdlich klingen, da ja die Energieerhaltung gilt. Er ist jedoch berechtigt, weil spezifische Formen von Energie, wie die kinetische Energie der Atmosphäre, aus Wärme erzeugt werden. Genauer gesagt geschieht dies auf Kosten von Wärme im Erdsystem unter Berücksichtigung der Hauptsätze der Thermodynamik. Die Thermodynamik gibt dabei eine klare Richtung in Zustände höherer Entropie vor und setzt der Menge an Energie eine Grenze, die aus einer bestimmten Quelle umgewandelt werden kann.

Ein Beispiel für eine solche thermodynamische Grenze ist der Carnot-Wirkungsgrad. Er sagt aus, dass nur ein Teil des Wärmeflusses in freie Energie umgewandelt werden kann und liefert dessen theoretisches Maximum. Die freie Energie kann anschließend genutzt werden, um Arbeit zu verrichten. Dieser Anteil ist proportional zum Temperaturunterschied zwischen der Wärmequelle und der Abwärme. So verbrennen Kohlekraftwerke bei etwa 600 °C und führen die Abwärme bei etwa 100 °C über die Kühltürme ab. Elektrische Energie wird typischerweise mit Wirkungsgraden von etwa 35 bis 40% erzeugt, was bedeutet, dass

120 | Phys. Unserer Zeit | 3/2019 (50) | Online-Ausgabe unter: wileyonlinelibrary.com | © 2019 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Kleidon (2019)
Physik in unserer Zeit
doi: 10.1002/piuz.201901540

Leibniz Online, Nr. 37 (2019)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285



Axel Kleidon

Was leistet die Erde und was trägt die Menschheit dazu bei? Antworten aus der Thermodynamik des Erdsystems

Veröffentlicht: 23.08.2019

1 Energie als Kernproblem

Die Gegenwart wird durch vielfältige Herausforderungen geprägt, verursacht vom Menschen und mit Konsequenzen, die sich bis auf die planetare Skala des Erdsystems auswirken. Der globale Klimawandel, Wasserknappheit in vielen Gebieten der Erde, der Verlust von Artenvielfalt, und die zukünftige Energieversorgung und Ernährung seien hier exemplarisch genannt. Die Vielzahl der Herausforderungen ist geradezu erdrückend und scheint es unmöglich zu machen, sich eine nachhaltige Zukunft für die Menschheit vorzustellen.

Was ich hier darlegen möchte ist, dass das zugrundeliegende Kernproblem ist, dass die Menschheit gewaltige Mengen an Energie verbraucht, die sie dem Erdsystem entnimmt, aber nicht dazu beiträgt, diese Energie zu erzeugen und nicht darauf achtet, schädliche Konsequenzen zu vermeiden. Was ich hier mit „schädlichen Konsequenzen“ bezeichne bezieht sich insbesondere auf die Fähigkeit des Systems Erde, Energie zu erzeugen. Ein weiteres Problem ist, dass der wesentliche Teil des menschlichen Energieverbrauchs gegenwärtig durch fossile Energieträger bestritten wird, Ressourcen, die durch die Biosphäre über Jahrmillionen aufgebaut wurden. Deren Nutzung ist wegen der endlichen Größe zwangsläufig nicht nachhaltig, und die damit verbundene Freisetzung von Treibhausgasen verursacht den globalen Klimawandel als schädliche Nebenwirkung.

Was in diesem Beitrag ferner darlegen möchte ist, dass der Fokus auf Energie Lösungsansätze für die Zukunft aufzeigen kann. Dazu braucht man eine Beschreibung des Systems Erde, die darauf basiert, woraus und in welcher Weise die vielfältigen Prozesse des Erdsystems Energie erzeugen, wie diese Energie verbraucht wird, und welche Rolle die Menschheit dabei spielt. Ich folge in dieser Beschreibung Arbeiten über die letzten Jahre, die das Erdsystem als thermodynamisches System beschreiben und quantifizieren (Kleidon 2010, 2012a,b, 2016).

Ein thermodynamisches Bild der Erde und der Menschheit ist an sich nicht neu. Schon Wilhelm Ostwald beschrieb einen solchen Blick auf die Menschheit Anfang des 20. Jahrhunderts (Ostwald, 1909), wie auch Alfred Lotka, insbesondere in seinem Lehrbuch „Elements of physical biology“ (Lotka 1925), oder Howard Odum in den 50er Jahren (Odum and Pinkerton, 1955). Jedoch hat sich seit diesen Arbeiten das Wissen an Prozessen und ihren Wechselwirkungen sowie die Fülle an Beobachtungen wesentlich entwickelt, sodass wir heute ein weit differenzierteres thermodynamisches Bild vom Erdsystem haben, welches quantitativ untermauert werden kann.

Ein Fokus auf Energie im Erdsystem startet mit der Feststellung, dass verschiedene Energieformen nicht unabhängig voneinander sind, sondern durch Energieumwandlungen miteinander verbunden werden, die sie letztendlich mit der einfallenden Solarstrahlung in Beziehung setzen.

Die Regeln für diese Umwandlungen werden dabei durch die Thermodynamik gesetzt. Energie bleibt erhalten, aber ihre Entropie, ein Maß für ihre Verteilung auf der Skala der Quantenphysik von Atomen und Molekülen, muss zunehmen. Ein Blick auf die Erde als Gesamtsystem, welches diese Regeln der Thermodynamik befolgt, Solarstrahlung in verschiedene Energieformen umwandelt und in die die Menschheit zunehmend eingreift, setzt dabei die Grundlage für einen Ausblick auf eine nachhaltige Zukunft.

Ich beschreibe hier diese energiebasierte Perspektive von der Rolle der Menschheit im Erdsystem genauer und untermauere sie mit Zahlen. Dazu kläre ich zunächst den Energiebegriff und beschreibe die grundlegenden, physikalischen Regeln, mit denen Energie umgewandelt wird. Ich beschreibe dann mithilfe dieser Regeln und einer Systemperspektive die Energieumwandlungen der Erde und gebe

Kleidon (2019)
Leibniz Online
<https://leibnizsozietat.de>