



**Kraftwerk Erde**

Wie das Erdsystem erneuerbare Energien  
erzeugt und Grenzen der Nutzung setzt



## Zusammenfassung

Die Erde arbeitet wie ein Kraftwerk, welches aus Solarstrahlung andere Formen von Energie erzeugt. Diese Energie erhält die Winde in der Atmosphäre, die Strömungen im Ozean, und die globalen biogeochemischen Kreisläufe wie z.B. den Wasserkreislauf. Die Thermodynamik beschreibt dabei die Grenzen der Energieerzeugungsraten und setzt die natürlichen Grenzen für die mögliche Nutzung als erneuerbare Energie. Globale Abschätzungen zeigen, dass mit Ausnahme von Sonnen- & Windenergie die natürlichen Erzeugungsraten gering sind und sich in der Größenordnung des Energieverbrauchs der Menschheit bewegen.

## Summary

The Earth works like a power plant generating energy out of its planetary drivers. This energy maintains the winds in the atmosphere, ocean currents, and global biogeochemical cycles such as the hydrological cycle. The laws of thermodynamics set the limits to the rates by which these forms of energy are generated and thereby limit the forms of energy that could potentially be used as renewable energy. The global estimate shows that - except for solar and wind power - the natural generation rates of renewable energy are rather small and in the order of the human energy consumption.



## 1. Die Erde als Kraftwerk

Erneuerbare Energien nutzen verschiedene natürliche Energieformen des Erdsystems, die durch den Menschen in für ihn nutzbare Energie umgewandelt werden. So nutzen zum Beispiel Solarzellen die Energie des Sonnenlichts, Windturbinen die Bewegungsenergie des Windes und Staudämme die Lageenergie des Flusswassers und wandeln diese Energieformen in elektrische Energie um. Die natürlichen Energieformen werden letztendlich aus dem einstrahlenden Sonnenlicht erzeugt. Die Verfügbarkeit und Nutzung als erneuerbare Energie wird daher durch die Raten bestimmt, mit denen natürliche Prozesse diese Energieformen im Erdsystem erzeugen und durch die Grenzen, mit denen diese maximal genutzt werden können. Diese Grenzen werden durch die Gesetze der Physik gesetzt, insbesondere durch die Hauptsätze der Thermodynamik. Dabei funktioniert das Erdsystem wie ein Kraftwerk und

operiert nach den gleichen physikalischen Gesetzen und Grenzen wie Generatoren, Dampfmaschinen oder, allgemeiner, Wärmekraftmaschinen.

Der "Brennstoff" des "Kraftwerks Erde" besteht aus Solarstrahlung, aber auch aus Erdwärme und Gezeitenkräften [1]. Die Solarstrahlung liefert dabei mit etwa 175 000 Terawatt (TW,  $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ ) den mit Abstand größten Antrieb, während die Erdwärme mit weniger als 50 TW und die Gezeiten mit 5 TW nur sehr wenig Energie in das System einbringen [1-3]. Die Maßeinheit Terawatt beschreibt dabei Wärmeflüsse und Umwandlungsraten, also Energieerzeugung oder Energieverbrauch pro Zeit. Um diese Zahlen in Bezug zu setzen, sei angemerkt, dass der menschliche Energieverbrauch in 2011 etwa 17 TW betrug, während die typische Leistung eines Kohlekraftwerks etwa 1000 MW (oder 0.001 TW) beträgt.

Energie in Zahlen. Energieerzeugung und Energieverbrauch misst Raten von Energieumwandlungen in Einheiten von Watt (W)

|                           |  |
|---------------------------|--|
| 1 W                       | Umwandlung von einem Joule pro Sekunde   |
| 25 W                      | Energiesparlampe   |
| 100 W                     | 2000 Kilokaloriendiät eines Menschen   |
| 830 W                     | mittlerer Stromverbrauch eines Bundesbürgers                                     |
| 5 200 W                   | mittlerer Primärenergieverbrauch eines Bundesbürgers                             |
| 428 000 000 000 W         | mittlerer Primärenergieverbrauch Deutschlands in 2012                            |
| 17 000 000 000 000 W      | mittlerer Primärenergieverbrauch der Menschheit 2012 (oder 2430 Watt pro Person) |
| 175 000 000 000 000 000 W | solare Einstrahlung  |

## 2. Grundlagen von Energieumwandlungen

Die physikalischen Grundlagen für Energieumwandlungen werden beschrieben durch die ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik. Der erste Hauptsatz beschreibt die Erhaltung der Gesamtenergie und bilanziert das Einbringen von Wärme, welches in einem Kraftwerk durch die Verbrennung von Brennstoffen erzeugt wird, mit der Abwärme sowie der produzierten Leistung. Der zweite Hauptsatz besagt, dass bei Energieumwandlungen die Gesamtenergie grundsätzlich stärker verteilt wird, was in der Physik als die Zunahme an Entropie bezeichnet wird.

Damit setzt der zweite Hauptsatz der maximalen Leistung eine feste Grenze durch die Bedingung, dass die Abwärme mindestens soviel Entropie exportieren muss wie durch das Einbringen von Wärme dem System hinzugefügt wird. Diese maximale Leistung wird bestimmt durch den Wärmefluss durch das System sowie den Temperaturunterschied zwischen der eingebrachten Wärme und der Abwärme. Der damit verbundene maximale Wirkungsgrad in der Umsetzung von Wärme in Leistung ist bekannt als der Carnot Wirkungsgrad.

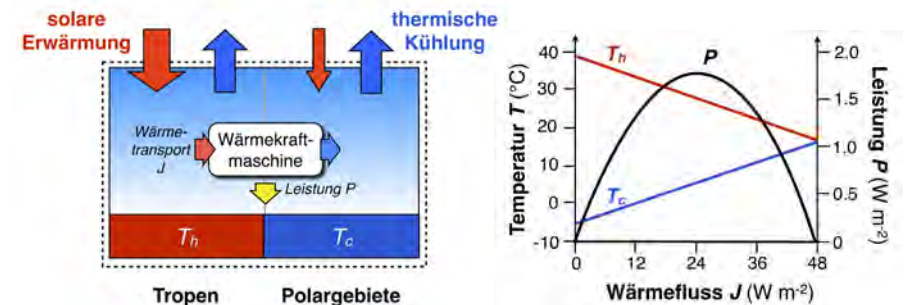


Abbildung 1: Anwendung der Thermodynamik auf die maximale Leistung, die großskalige Windenergie erzeugen kann. Links: Unterschiede in solarer Einstrahlung zwischen Tropen und Polargebieten erzeugen Temperaturunterschiede (hier dargestellt durch die zwei Temperaturen,  $T_h$  (warm) und  $T_c$  (kalt)), die von der Atmosphäre in kinetische Energie umgesetzt werden können. Die dabei entstehenden Winde transportieren Wärme und verringern den Temperaturunterschied (rechts). Durch dieses Wechselspiel zwischen Wärmefluss und Temperaturunterschied gibt es eine Grenze der Leistung, die im Vergleich zur transportierten Wärme sehr gering ist. Nach [1-3].

Im Erdsystem entsteht der Antrieb nicht durch Verbrennung, sondern durch unterschiedlich starke Erwärmung der Erdoberfläche, die durch die unterschiedlichen Neigungen der Erdoberfläche zum einfallenden Sonnenlicht entsteht. Dadurch gibt es großskalige Unterschiede in der solaren Einstrahlung zwischen den Tropen und den Polargebieten, und die Oberflächen dieser Regionen werden unterschiedlich stark erwärmt. Dieser Unterschied in der Erwärmung agiert als Antrieb für die Umsetzung von Wärme in Windenergie und zeigt sich in der großskaligen atmosphärischen Zirkulation. Die Grenzen der natürlichen Erzeugung von kinetischer Energie lassen sich dabei mit Hilfe eines einfachen Modells bestimmen (Abb. 1). Das einfache Modell beschreibt die Energiebilanz der Tropen und der Polargebiete sowie eine Wärmekraftmaschine, die durch

den Temperaturunterschied angetrieben wird und Windenergie erzeugt. Je mehr Wärme diese Maschine nutzt und dabei von den Tropen in die Polargebiete transportiert, desto mehr Leistung kann diese Maschine erzeugen. Allerdings wird mit zunehmendem Wärmetransport der Temperaturunterschied ausgeglichen, was die Leistung vermindert. Dies führt zu einem optimalen Wirkungsgrad von lediglich 2% mit einer maximalen globalen Leistung von etwa 1000 TW [1-3]. Das Erstaunliche hierbei ist nicht, dass es diese Grenze gibt, sondern dass die aus Beobachtungen ermittelte Leistung der Atmosphäre tatsächlich in dieser Größenordnung liegt, also dass die Atmosphäre nahe der maximalen Leistung operiert. Diese Feststellung wurde mit detaillierten Modellsimulationen der atmosphärischen Zirkulation bestätigt [4].

### 3. Energieerzeugung im Erdsystem

Die Bewegungsenergie (oder kinetische Energie) des Windes, die aus Erwärmungsunterschieden erzeugt wird, wird über die gesamte Atmosphäre verteilt und durch Reibung an der Oberfläche wieder in Wärme umgewandelt. Ein Teil der Bewegungsenergie der Atmosphäre verrichtet weitere Arbeit: Über dem Ozean treibt Wind die Wellenbildung an, wobei ein Teil der Bewegungsenergie des Windes in Wellenenergie umgewandelt wird (Abb. 2). Ein Teil der Wellenenergie geht schließlich

in der Bewegungsenergie der Ozeanströmungen auf. Ebenso treibt Luftbewegung die Verdunstung an der Oberfläche sowie die Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre an, und damit den globalen Wasserkreislauf. Regnet das Wasser über Land ab, so erreicht es höhergelegene Oberflächen über dem Meeresspiegel. Die damit verbundene potentielle Energie wird genutzt für den Wassertransport in Flusssystemen.

Diese Beispiele von Energieumwandlungen zeigen auf, wie stark sie innerhalb des Gesamtsystems Erde miteinander verknüpft sind. Ferner wird bei jeder Energieumwandlung ein Teil in Wärme zurückverwandelt, um dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu genügen. Dies bedeutet, dass jede weitere Umwandlung mit weniger Leistung verbunden ist. So wird

aus der einstrahlenden Solarstrahlung von 175.000 Terawatt nur etwa 1.000 TW Leistung in den großskaligen Winden der Atmosphäre. Weitere Umwandlungen in andere Energieformen, wie Wellenenergie oder Wasserkraft, sind noch geringer, und nur 1 TW Leistung sind letztendlich verbunden mit der windgetriebene Zirkulation des Ozeans.

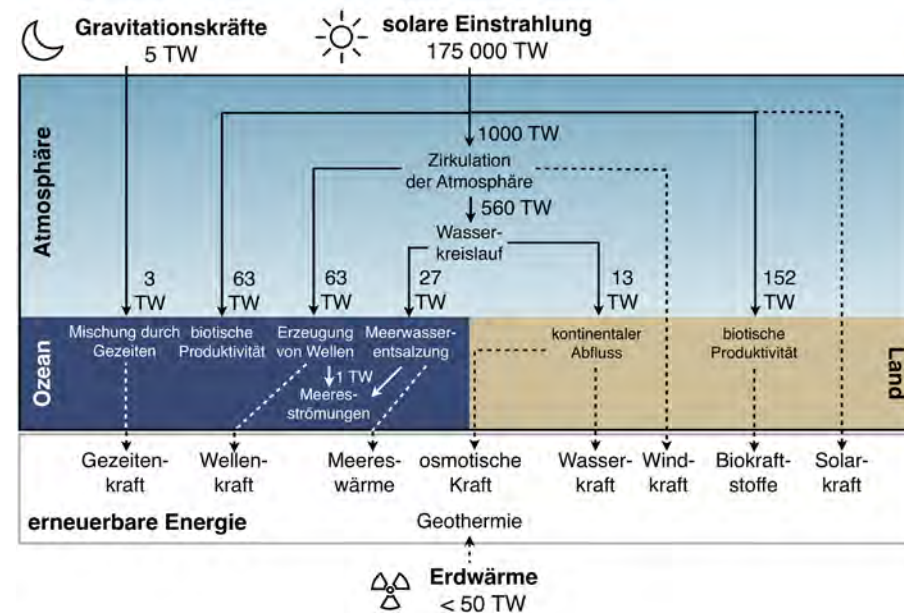


Abbildung 2: Überblick von Energieumsatzraten im Erdsystem. Aus den drei Antrieben, solare Einstrahlung (175 000 TW = 175 10<sup>15</sup> W), Erdwärme (< 50 TW) und Gezeitenkräften (5 TW) erzeugen Erdsystemprozesse verschiedene Energieformen, die als erneuerbare Energien genutzt werden könnten. Zum Vergleich: Der globale Energieverbrauch der Menschheit im Jahr 2011 betrug 17 TW. Die Energieumsatzraten werden dargestellt in Einheiten der Leistung, also Arbeit pro Zeit, mit 1 TW = 1 Terawatt = 10<sup>12</sup> W. Nach [3, 5].

## 4. Schlussfolgerungen

Dieser Überblick zeigt, wie verschiedene Energieformen, die als erneuerbare Energien genutzt werden könnten, in die Funktionen des Erdsystems integriert sind [5]. Die Abschätzung der verfügbaren Energiepotenziale zeigt, dass der Energieverbrauch durch die Menschen von 17 TW in der gleichen Größenordnung liegt wie die Leistung, die mit vielen Erdsystemprozessen verbunden ist. Die Verbindung von Erdsystemprozessen mit verschiedenen Formen von erneuerbarer Energie ist ebenfalls in Abb. 2 gezeigt.

Dabei haben nur die direkte Nutzung

der Solarenergie, z.B. durch Photovoltaik oder Solarthermie, und die Windenergie ein deutlich größeres Potential als der gegenwärtige Energieverbrauch durch den Menschen (Abb. 3). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die anderen Formen erneuerbarer Energie entweder aus sehr viel schwächeren Antrieben gebildet werden (Gezeiten, Erdwärme) oder mehrfach umgewandelte Solarenergie darstellen (z.B. Wasserkraft, Wellenkraft). Die direkte Nutzung der Sonnenenergie ist mit den geringsten Umwandlungsverlusten verbunden und stellt daher mit Abstand das größte Potential für erneuerbare Energie dar.

## Referenzen

- [1] Kleidon, A. Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. *Physics of Life Reviews*, 7, 424-460 (2010).
- [2] Kleidon, A. How does the Earth system generate and maintain thermodynamic disequilibrium and what does it imply for the future of the planet? *Phil. Trans. R. Soc. A* 370, 1012-1040 (2012).
- [3] Kleidon, A. Thermodynamik des Erdsystems: Was leistet die Erde? *Physik in unserer Zeit* 43, 136-144 (2012)
- [4] Kleidon, A.; Fraedrich, K.; Kirk, E.; Lunkeit, F. Maximum entropy production and the strength of boundary layer exchange in an atmospheric general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 33, L06706 (2006)
- [5] Kleidon, A.; Gans, F.; Miller, L. M.; Pavlick, R. Sonne, Wind und Wellen -- Natürliche Grenzen erneuerbarer Energien im Erdsystem. in: Beckmann, M.; Hurtado, A. (eds.) *Kraftwerktechnik*, Band 43, TK Verlag, 463-470 (2011)

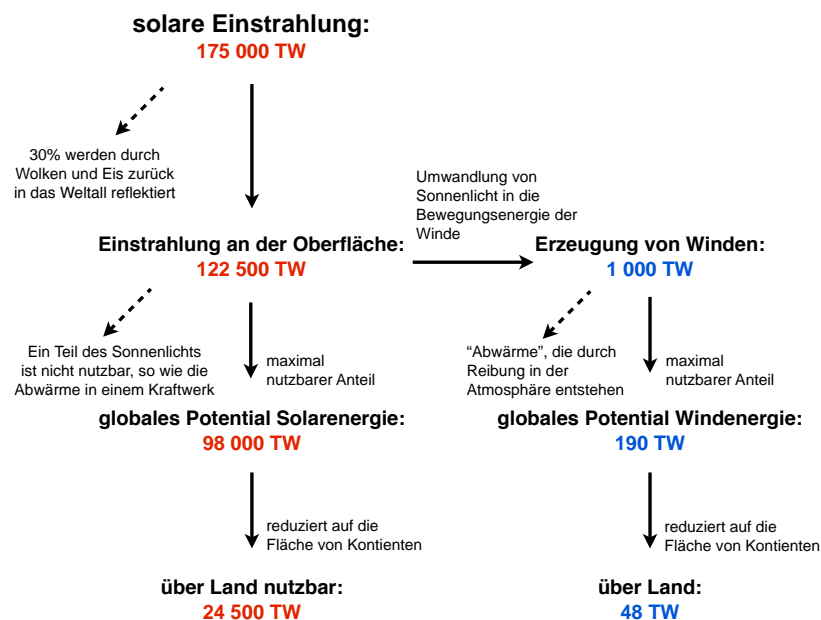


Abbildung 3: Abschätzung von den theoretischen Möglichkeiten, wieviel erneuerbare Energie aus Sonnen- und Windenergie erzeugt werden kann.

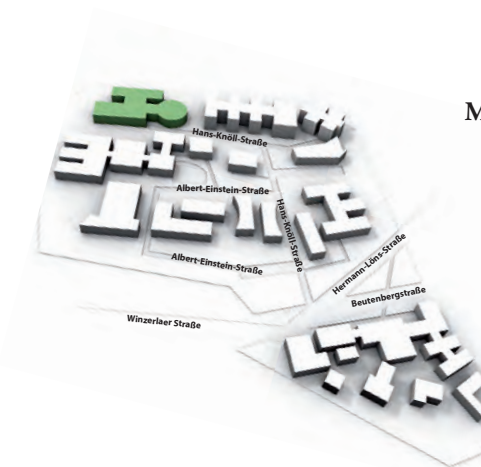
## Arbeitsgruppe „Biosphärische Theorie und Modellierung“

Die Arbeitsgruppe arbeitet an theoretischen Ansätzen, um die Erde als komplexes Gesamtsystem zu verstehen, das stark durch die Wechselwirkungen, Leben, und den Menschen geprägt wird. Der Forschungsansatz nutzt dabei eine Perspektive, in dem die Erde als Kraftwerk betrachtet wird, welches aus Solarstrahlung andere Formen von Energie erzeugt. Diese Energie erhält die Winde in der Atmosphäre, die Strömungen im Ozean, und die globalen biogeochemischen Kreisläufe von Wasser und Kohlenstoff. Dazu wird die Thermodynamik benutzt, um die Grenzen der Energieumsatzraten dieser Prozesse zu bestimmen. Der Ansatz wird auf verschiedene Themen der Erdsystemforschung angewandt, z.B. um den Einfluss des Leben besser zu verstehen, die Änderungen von biogeochemischen Kreisläufen aus einfachen Ansätzen zu beschreiben oder die natürlichen Grenzen von erneuerbaren Energien zu ermitteln.



Gruppenleitung:  
Dr. Axel Kleidon

Tel.: +49 (0)3641 57-6217  
E-Mail: [akleidon@bgc-jena.mpg.de](mailto:akleidon@bgc-jena.mpg.de)



## Impressum

Text: Dr. Axel Kleidon

**Herausgeber:**  
**Max-Planck-Institut für Biogeochemie**

Hans-Knöll-Straße 10  
D-07745 Jena  
Tel.: +49-(0)3641-5760  
Fax: +49-(0)3641-5770

E-Mail: [info@bgc-jena.mpg.de](mailto:info@bgc-jena.mpg.de)  
Web: [www.bgc-jena.mpg.de](http://www.bgc-jena.mpg.de)

Forschungskoordination:  
Dr. Eberhard Fritz  
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit:  
Susanne Hermsmeier

Layout, Satz: Silvana Schott

Bildquelle Erdkugel: NASA

Jena, November 2013