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

Größenordnungen an, wie viel verschiedene Formen von Energie von natürlichen Prozessen erzeugt werden. Ich gehe dann auf die menschliche Aktivität ein sowie die Menge an Energie, die diese dabei verbraucht. Dabei werden wir sehen, dass die Größenordnung des Energieverbrauchs der Menschheit ähnlich groß ist wie natürliche Energieumwandlungen im Erdsystem, was die Schaffung des Begriffs des "Anthropozäns" (Crutzen 2002) zur Beschreibung der geologischen Gegenwart untermauert. Am Ende dieses Beitrags gehe ich dann darauf ein, wie durch menschliche Technologie mehr Energie erzeugt werden kann als durch natürliche Prozesse, und wie dies zu einer Zukunft des Erdsystems führen kann, in dem das gesamte System aktiver wird hinsichtlich von Energie- und Massenumwandlungen. Eine Entwicklung der Menschheit in diese Richtung würde der allgemeinen Entwicklung von Systemen entsprechen, ihre Energiedurchsätze zu maximieren, aber für die Menschheit bedarf es bewusster Planung, um diese Entwicklung zu ermöglichen und umzusetzen.

2 Energieumwandlungen im Erdsystem

Energie kommt in verschiedensten Formen im Erdsystem vor, von der Energie in der Strahlung der Sonne, thermischer Energie oder Wärme, die über Temperatur gemessen wird, Bewegungsenergie der atmosphärischen Zirkulation oder chemischer Energie, die in Kohlehydraten steckt. Diese Formen von Energie werden dabei ineinander umgewandelt. Zum Beispiel wird Wärme erzeugt, wenn solare Strahlung absorbiert wird. Wenn die Luft dabei erwärmt wird, leichter wird, und aufsteigt, so wird ein Teil dieser Wärme in die Bewegung der Luft umgewandelt.

Diese Energieumwandlungen unterliegen grundsätzlichen physikalischen Regeln, die als Hauptsätze der Thermodynamik bekannt sind. Der erste Hauptsatz sagt dabei aus, dass bei jeder Energieumwandlung die Gesamtmenge an Energie erhalten bleibt, was auch allgemein als Energieerhaltung in der Physik bekannt ist. Der zweite Hauptsatz sagt aus, dass Energie zunehmend mehr verteilt wird, eine Eigenschaft, die durch den Begriff der Entropie beschrieben wird.

Im Folgenden gehe ich zunächst auf den Entropiebegriff näher ein und beschreibe, wie er die Grundlage bildet, die Dynamiken der Quantenphysik auf physikalische Größen der klassischen Physik abzubilden bevor ich die Hauptsätze mit mehr Detail beschreibe. Danach schließe ich mit zwei relevanten Konsequenzen der Hauptsätze an, nämlich inwiefern sie die Richtung von Prozessen diktiert und wie sie Grenzen für Energieumwandlungen setzen.

2.1 Der Entropiebegriff

Der Entropiebegriff hat eine präzise Definition aus der statistischen Physik. In der Welt der Quantenphysik kommt Energie in diskreten Mengen als Quanten vor. Diese Energiequanten können in Form von Strahlung vorkommen (den sogenannten Photonen), verbunden sein mit verschiedenen Zuständen von Elektronen in Atomen und Molekülen, oder mit verschiedenen Bewegungs- oder Vibrationsmoden von Molekülen. Diese Sicht von Energie wird auch als mikroskopische Welt beschrieben. Da Energie gequantelt vorkommt, können wir die verschiedenen Verteilungsmöglichkeiten einer gewissen Energiemenge abzählen und damit Wahrscheinlichkeiten zuordnen. Entropie ist dann als die Wahrscheinlichkeit definiert, mit der Energie in der mikroskopischen Welt verteilt ist.

Die wahrscheinlichste Verteilung ist dann ein Zustand maximaler Entropie.

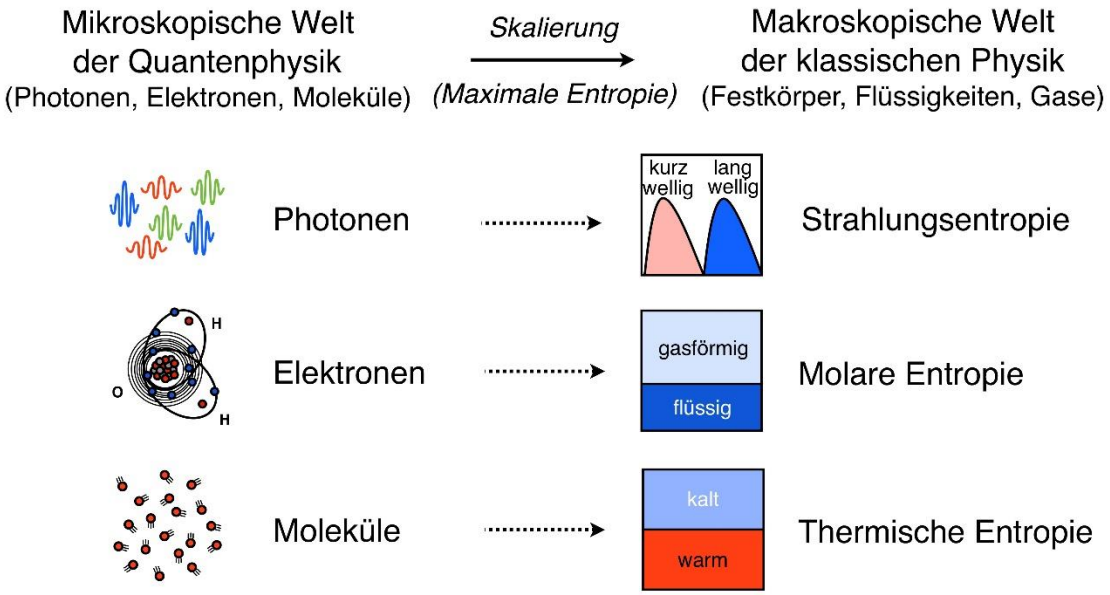


Abbildung 1: Im Erdsystem spielen drei verschiedene Entropieformen eine Rolle, die mit unterschiedlichen Verteilungen von Energie auf der Skala der Quantenphysik verbunden sind.

Erdsystemprozesse werden allerdings in der Regel mit sogenannten makroskopischen Größen der klassischen Physik beschrieben, wie Strahlungsflüsse, chemische Eigenschaften, Temperatur, Wärmekapazität und Dichte. Der Bezug zur mikroskopischen Verteilung von Energie entsteht dadurch, dass man den Zustand maximaler Entropie annimmt. Dadurch werden die klassischen Größen definiert. So hat Boltzmann mit der kinetischen Gastheorie den Zusammenhang zwischen der mikroskopischen Verteilung von Energie über Moleküle mit den Größen des Gases (Temperatur, Dichte, Druck) hergestellt, während Planck mit dem gleichen Ansatz, angewandt auf Photonen, die klassischen Strahlungsgesetze von Stefan und Boltzmann sowie das Wiensche Verschiebungsgesetz aus der Annahme maximaler Entropie ableitete.

So brauchen wir für die Beschreibung von Energie im Erdsystem drei verschiedene Entropieformen (**Abbildung 1**).

Die erste dieser drei Formen ist die Strahlungsentropie, und sie bezieht sich auf die Verteilung von Energie in der Strahlung. Auf der mikroskopischen Skala wird die damit verbundene Verteilung maximaler Entropie in der statistischen Physik durch die sogenannte Bose-Einstein Statistik beschrieben. Kurzwelligere Strahlung, welche bei höherer Temperatur abgestrahlt wurde, entspricht dabei niedrigerer Strahlungsentropie als langwelligere Strahlung, die bei niedrigerer Temperatur abgestrahlt wurde.

Die zweite Entropieform ist mit der Verteilung von Energie über Elektronenzustände in Atomen und Molekülen verbunden. Für diese Entropieform nutze ich den Begriff “molare Entropie”. Auf der mikroskopischen Skala ist der Zustand maximaler Entropie verbunden mit der sogenannten Fermi-Dirac Statistik. Änderungen dieser Entropieform sind verbunden mit Phasenübergängen zwischen fest, flüssig und gasförmig sowie mit chemischen Änderungen. Konkrete Entropiewerte sind typischerweise in Tabellen von Chemie-Lehrbüchern zusammengefasst (z. B. Atkins und de Paula, 2010). Allgemein kann man sagen, dass Moleküle in der Regel höhere molare Entropie haben als Atome, und Gase höhere molare Entropie haben als Flüssigkeiten oder Festkörper. Dies hat damit zu tun, dass die Elektronen in den jeweils ersteren Fällen mehr Verteilungsmöglichkeiten haben als in letzteren Fällen.

Die dritte Entropieform ist die klassische Entropie der Wärmelehre, die ich hier als “thermische Entropie” bezeichne. Auf mikroskopischer Skala ist der Zustand maximaler Entropie hier durch die Maxwell-Boltzmann Statistik beschrieben. So hat ein wärmeres Gas höhere Entropie als ein kälteres Gas. Beim wärmeren Gas gibt es durch die größere Energiemenge mehr Energiequanten, die über eine größere Zahl von Zuständen verteilt werden können.

2.2 Die Hauptsätze der Thermodynamik

Mit dieser Beschreibung der Entropie in ihren drei verschiedenen Formen können wir uns nun den Hauptsätzen der Thermodynamik zuwenden. Ich betrachte sie hier in vereinfachter Form, indem ich sie in einem stationären Zustand betrachte, in dem sich zeitliche Änderungen, integriert über hinreichend lange Zeitskalen, aufheben. Dadurch vereinfacht sich die Beschreibung.

Bei Erdsystemprozessen hat man in der Regel mit nichtisolierten bzw. offenen Systemen zu tun, die Energie und/oder Masse mit ihrer Umgebung austauschen. Dies bedeutet, dass wir für die Formulierung der Hauptsätze Austauschflüsse verschiedener Entropie in der Beschreibung berücksichtigen müssen.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik kann dann wie folgt ausgedrückt werden

$$\frac{dU}{dt} = 0 = J_{in} - J_{out} - G + D \quad (1)$$

Hierbei ist U die Energieform des Systems, welches wir beschreiben (typischerweise Wärme oder thermische Energie), Jin und Jout die Energieflüsse, die dem System Energie hinzufügen oder entziehen (z. B. durch Absorption und Emission von Strahlung), G ist die Rate, mit der eine andere Energieform erzeugt wird (z. B. kinetische Energie), während D die Dissipation ist, also die Rückführung aus einer anderen Energieform (z.B. Wärme durch Reibung von Luftbewegung).

Typischerweise wird in der Thermodynamik U gleich der inneren Energie gesetzt, also der Summe verschiedener Energieformen. Da es im Erdsystem eine ganze Reihe von Energieformen gibt, und diese innerhalb der verschiedenen Disziplinen häufig isoliert betrachtet werden, empfiehlt es sich, die Bilanzen verschiedener Energieformen getrennt zu betrachten. Als Beispiel sei hier die kinetische Energie der Atmosphäre genannt, die zwar aus Erwärmungsunterschieden entsteht (und durch Reibung in Wärme zurückgeführt wird), aber deren Dynamik über die Navier-Stokes Bewegungsgleichungen in der Regel getrennt betrachtet wird, also als ein Prozess, der außerhalb des Systems stattfindet (bezüglich der damit verbundenen Variablen, wenn auch im gleichen Raum).

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik manifestiert sich in einem nichtisolierten System in der sogenannten Entropiebilanz. Sie beschreibt die Änderung der Entropie des Systems, dS/dt, und setzt sie in Bezug mit der Zuführung und Abführung von Entropie durch Austauschflüsse sowie durch die Entropieproduktion σ von Prozessen innerhalb des Systems:

$$\frac{dS}{dt} = 0 = \frac{J_{in}}{T_{in}} - \frac{J_{out}}{T_{out}} + \sigma \quad (2)$$

Die Zuführung und Abführung von Entropie ist hier dargestellt für die Wärmeflüsse Jin und Jout, die Wärme bei Temperaturen Tin bzw. Tout hinzufügen bzw. abführen. Die Entropieflüsse sind dann jeweils durch den Ausdruck J/T gegeben. Der zweite Hauptsatz fordert dann, dass die Entropieproduktion innerhalb des Systems größer oder gleich Null ist, also $\sigma \geq 0$, aber nicht negativ werden kann.

Diese beiden Hauptsätze der Thermodynamik, vereinfacht dargestellt durch die Gleichungen (1) und (2), gelten für alle Energie- und Entropieformen und Prozesse der Erde. Die Dynamik des Erdsystems äußert sich letztendlich dadurch, dass Prozesse dem zweiten Hauptsatz folgen, Gradienten abbauen, und Entropie erzeugen, was sich dann in der Entropiebilanz über $\sigma > 0$ darstellt. Dies ist in einem stationären Zustand möglich, wenn dem System Energie mit niedriger Entropie kontinuierlich zugeführt wird (über den Term Jin/Tin), und Energie mit hoher Entropie abgeführt wird (über den Term Jout/Tout). Die Entropie, die dann in dem System erzeugt werden kann, ist dann beschrieben über

$$\sigma = \frac{J_{in}}{T_{out}} - \frac{J_{in}}{T_{in}} \quad (3)$$

wobei ich hier die Stationarität der Austauschflüsse Jin = Jout angenommen habe. Wir haben es in diesem Fall mit einem System zu tun, welches sich in einem Zustand von thermodynamischen Nichtgleichgewicht befindet.

Wir können anhand von Gleichung (3) ebenfalls erkennen, dass ein System ohne Austauschflüsse (Jin = Jout = 0) in einem stationären Zustand keine Entropie erzeugen kann. Es befindet sich dann in einem Zustand maximaler Entropie und thermodynamischen Gleichgewichts. Es sind also die Austauschflüsse von verschiedener Entropie in Form von Strahlung, Massenflüsse in verschiedener

chemischer Form, oder Wärme, die einen Zustand des thermodynamischen Nichtgleichgewichts erhalten.

2.3 Entropie gibt Richtung vor

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik gibt dem Erdsystem die Richtung von Energieumwandlungen vor. Der Ausgangspunkt ist dabei die Energieerzeugung durch Kernfusion innerhalb der Sonne, die Energie bei sehr hohen Temperaturen und somit von sehr niedriger Entropie erzeugt (**Abbildung 2**). Wenn diese Energie von der Sonne in das Weltall abgestrahlt wird, geschieht dies noch bei sehr hohen Temperaturen von etwa 5500°C, was sich im Spektrum der emittierten Strahlung, überwiegend im sichtbaren Bereich, widerspiegelt. Wenn Solarstrahlung in 150 Millionen Kilometer Entfernung auf die Erde stößt, so ist die Strahlung nicht mehr im thermodynamischen Gleichgewicht. Etwa 70% der eintreffenden Strahlung wird an der Oberfläche bei Temperaturen um die 15°C (Oberflächentemperatur im globalen Mittel) absorbiert und damit auf ein sehr viel kühleres Temperaturniveau gebracht. Der Absorptionsprozess von Solarstrahlung produziert somit gewaltige Mengen an Entropie, was in **Abbildung 2** mit "Prozesse, die Solarstrahlung absorbieren" (roter Kasten) gekennzeichnet ist.

Durch Emission von Strahlung der Erdoberfläche und durch Wärmeflüsse, die mit Luftbewegung verbunden sind, wird diese Energie der Atmosphäre zugeführt, und von ihr bei kälterer Temperatur um die -18°C, der sogenannten Strahlungstemperatur der Erde, in das Weltall im infraroten Bereich abgestrahlt. Dieser Unterschied zwischen Oberflächentemperatur und Strahlungstemperatur der Erde erlaubt es der Atmosphäre Arbeit zu verrichten (z. B. Erzeugung von Luftbewegung, Antrieb des Wasserkreislaufs), ein Aspekt, der in **Abbildung 2** als "Klimasystemprozesse" zusammengefasst ist (blauer Kasten) und auf dem wir im Abschnitt 3 näher eingehen werden.

Im Mittel bilanzieren sich die Absorption und Emission von Strahlung der Erde, und der wesentliche Unterschied liegt in der Entropie der Strahlungsflüsse. Während bei solarer Strahlung Energie auf vergleichsweise wenige, energiereiche Photonen verteilt ist, ist die emittierte terrestrische Strahlung auf wesentlich mehr, energieärmere Photonen verteilt. Die planetare Entropiebilanz (**vgl. Gleichung (2)**) ist somit eine Bilanz der Strahlungsentropie, wobei die hinzugeführte Energie die Solarstrahlung ist (mit Tin ≈ TSonne ≈ 5500°C, entsprechend niedrige Entropie), während Energie durch Emission terrestrischer Strahlung abgeführt wird (mit Tout ≈ TErde ≈ -18°C, entsprechend hohe Entropie).

Durch diesen Entropieaustausch durch Strahlung wird das Erdsystem in einem Zustand fern des thermodynamischen Gleichgewichts gehalten. Er erlaubt es, eine ausgeprägte Dynamik und stark dissipative Prozesse zu unterhalten, die sich in aktiver atmosphärischer Zirkulation, Wasserkreislauf, Leben, und schließlich auch der Aktivität der Menschheit niederschlägt.

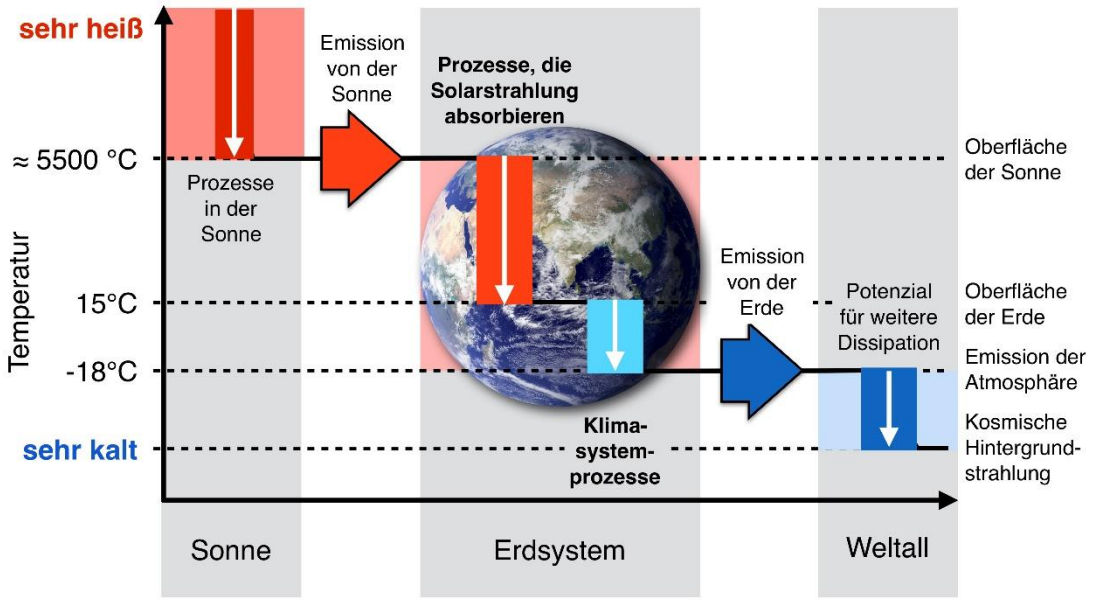


Abbildung 2: Der Gang der Energie vom Inneren der Sonne über Solarstrahlung, Absorption durch die Erde, und Re-emission bei kühlerer Temperatur folgt dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu Zuständen höherer Entropie.

2.4 Entropie setzt Grenzen

Eine weitere Relevanz der Entropie ist, dass sie fundamentale Grenzen für Energieumwandlungen setzt. Dies möchte ich hier direkt aus den Formulierungen der beiden Hauptsätze herleiten, was von der typischen Herleitung in Lehrbüchern der Thermodynamik abweicht. Diese Beschränkung trifft auf Energieumwandlungen in Kraftwerken zu, aber auch auf solche im Erdsystem (**Abbildung 3**).

Ich möchte diese Herleitung zunächst an der Energieerzeugung in einem Kraftwerk darlegen. Dazu betrachten wir die Formulierungen der beiden Hauptsätze für diesen Prozess in stark vereinfachter Form, wie oben beschrieben.

Ein Kraftwerk erzeugt elektrische Energie, oder auch freie Energie, die ich hier definieren möchte als Energie ohne Entropie, die Arbeit verrichten kann. Der Ausgangspunkt der Energieerzeugung ist eine Wärmequelle mit hoher Temperatur, also einer Energiequelle von niedriger Entropie. Dies wird in einem konventionellen Kraftwerk z. B. durch die Verbrennung von Kohle erzeugt. Verbrennung führt der Energieumwandlung innerhalb des Systems Kraftwerk niedrige Entropie hinzu. Ein Teil dieser Energie wird abgeführt über die Kühltürme des Kraftwerks, allerdings bei erheblich geringerer Temperatur. Somit führt die Abwärme des Kraftwerks Entropie aus dem System ab. Die Stromerzeugung hingegen führt keine Entropie ab, da ja die elektrische Energie in das Stromnetz eingespeist wird, um später Arbeit zu verrichten und erst dann diese Energie wieder in Wärme umgewandelt wird.

Die drei Energieflüsse, Verbrennungswärme, Abwärme, und Stromerzeugung werden im ersten Hauptsatz der Thermodynamik bilanziert (**vergleiche Gleichung (1)**):

$$G = J_{in} - J_{out} \quad (4)$$

Die Dissipation ist hierbei D = 0 gesetzt, da die freie Energie in Form von Elektrizität ja erst ausserhalb des Kraftwerks wieder in Wärme umgewandelt wird.

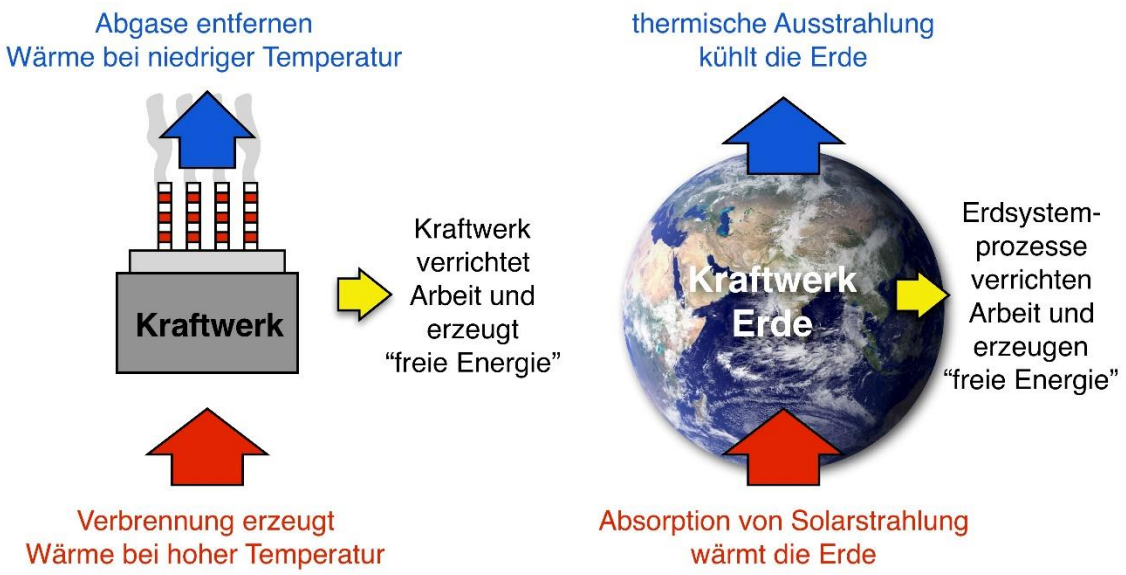


Abbildung 3: Stromerzeugung in einem Kraftwerk ist ein Beispiel, wie aus Wärme freie elektrische Energie erzeugt wird. Physikalische Erdsystemprozesse funktionieren im Prinzip ähnlich und erzeugen verschiedene Formen von freier Energie im Erdsystem.

Die Obergrenze von wie viel freie Energie maximal erzeugt werden kann (also wo G maximal ist) wird durch den zweiten Hauptsatz gegeben (**Gleichung 2**). Der Idealfall ist derjenige, in dem innerhalb des Erzeugungsprozesses keine Entropie erzeugt wird, also σ = 0. Dann kann man Gleichung 2 nutzen, um Jout als Funktion von Jin, Tin und Tout zu formulieren:

$$J_{out} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \cdot J_{in} \quad (5)$$

In Gleichung (4) eingesetzt ergibt dies den Ausdruck der allgemeinen Carnot'schen Grenze der Leistung, die maximal erzeugt werden kann:

$$G = J_{in} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} \quad (6)$$

wobei der zweite Term auf der rechten Seite mit den Temperaturen typischerweise als Carnot'scher Wirkungsgrad bezeichnet wird.

Es sei hier angemerkt, dass die hier beschriebene Herleitung im Unterschied zu Lehrbüchern keine spezifischen Annahmen über den zugrunde liegenden Kreisprozess braucht. Der Carnot'sche Wirkungsgrad und die damit verbundene Grenze von Erzeugung freier Energie folgt direkt aus der Kombination des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.

Diese allgemeine Herleitung von Grenzen der Energieumwandlung ist nicht nur auf Wärme anwendbar, sondern auch auf Strahlung. Dabei sind die Ausdrücke für Flüsse von Strahlungsentropie leicht anders (siehe, z. B., Kabelac, 1994). Die Anwendung des ersten und zweiten Hauptsatzes auf Strahlung führt zu theoretischen Obergrenzen und maximale Wirkungsgrade bei der Nutzung der Solarenergie, z. B. durch die Photovoltaik. Da Solarstrahlung mit einer sehr hohen Emissionstemperatur verbunden ist, sind die Entropieflüsse sehr gering. Der maximale Wirkungsgrad von direkter Nutzung der Solarenergie, also ohne Zwischenschritte in denen Solarenergie erst in Wärme umgewandelt wurde, ist mit 73-95% sehr hoch, wobei der maximale Wirkungsgrad von der Art der genutzten Strahlung (direkt oder diffus) abhängt.

3 Was leistet die Erde?

Im Erdsystem wird Energie nach den gleichen Regeln der Thermodynamik erzeugt (**Abbildung 3**). Die Energiequelle für Energieumwandlungen ist hierbei die absorbierte Solarstrahlung und der Entropieexport wird durch die Emission terrestrischer Strahlung bewerkstelligt. Das Klimasystem, die Biosphäre, und menschliche Technologie kann dabei auf unterschiedlicher Weise aus der Solarstrahlung Energie erzeugen, durch unterschiedliche Prozesse und mit unterschiedlichen

maximalen Wirkungsgraden. Die daraus entstehenden Dynamiken im System wandeln die erzeugte Energien in weitere Formen um, und dies kann dann die planetaren Randbedingungen, wie Strahlungseigenschaften beeinflussen. Diese hierarchische Struktur von Energieumwandlungen und entsprechenden Konsequenzen ist in **Abbildung 4** zusammengefasst.

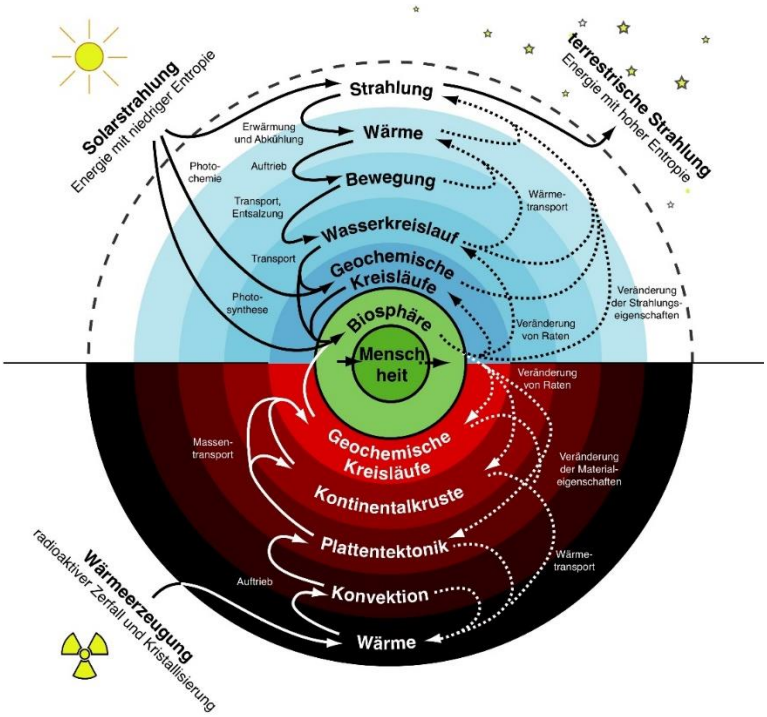


Abbildung 4: Solare Einstrahlung führt der Erde Energie niedriger Entropie hinzu, die durch verschiedene Prozesse in andere Formen umgewandelt wird. Die daraus entstehende Dynamik verteilt Energie und ändert Strahlungs- und Materialeigenschaften des Planeten, wozu es zu Wechselwirkungen zwischen Prozessen im Erdsystem und den planetaren Randbedingungen kommt. (Nach Kleidon 2010, 2012, 2016).

3.1 Abiotische Energieumwandlungen

Die rein physikalischen Prozesse des Klimasystems nutzen Unterschiede in Erwärmung, die durch die Absorption von Solarstrahlung entstehen. Diese Erwärmungsunterschiede werden dann wie bei einem Kraftwerk in Arbeit und Bewegungsenergie umgewandelt. Die daraus entstehende Luftbewegung baut dabei die Unterschiede in Erwärmung ab.

Man kann mit einer relativ einfachen Formulierung zeigen, dass die Atmosphäre nahe an ihrer Leistungsgrenze operiert und dabei so hart arbeitet, wie es die Thermodynamik erlaubt. Dies sei im Folgenden durch ein einfaches Modell dargestellt (**Abbildung 5**). Wir betrachten dazu den vertikalen Unterschied in Temperaturen zwischen der Erdoberfläche und der Temperatur, mit der die absorbierte Solarstrahlung letztendlich in das Weltall abgestrahlt wird. Dieser Temperaturunterschied entsteht, weil die einfallende Solarstrahlung überwiegend an der Erdoberfläche absorbiert wird, während die Emission ins Weltall überwiegend in der Atmosphäre stattfindet.

Dieser Temperaturunterschied wird von der Atmosphäre genutzt, um vertikale Luftbewegung zu erzeugen. Wir können uns dazu vorstellen, dass die resultierende Luftbewegung Wärme transportiert, mit der, wie in einem Kraftwerk, Arbeit erzeugt wird, die die Luft gegen die Reibungskräfte in Bewegung hält.

Die maximale Leistung, die dabei erreicht werden kann, ist durch die Carnot Grenze (**Gleichung 6**) gegeben. Eingebettet im Kontext des Erdsystems gibt es aber eine Besonderheit. Die Temperatur der Oberfläche wird durch den Wärmetransport der Luftbewegung gesenkt, was dazu führt, dass der zweite Term in **Gleichung 6** (also der Carnot'sche Wirkungsgrad) mit zunehmenden Wärmefluss abnimmt.

Diese Beziehung kann durch die Energiebilanz der Oberfläche quantitativ beschrieben werden. Dazu beschreiben wir diese im zeitlichen Mittel durch

$$R_s + R_{l,d} = R_{l,u} + J \quad (7)$$

Hierbei wärmen die beiden Terme auf der linken Seite der Gleichung die Oberfläche, mit Rs als die absorbierte Solarstrahlung, während Rl,d die sogenannte atmosphärische Gegenstrahlung beschreibt, also die terrestrische Strahlung, die von der Atmosphäre zur Oberfläche hin emittiert wurde. Die beiden Terme auf der rechten Seite kühlen die Erdoberfläche durch Emission (mit Rl,u = σ Ts^4 durch das Stefan-Boltzmann Gesetz beschrieben) und durch den konvektiven Wärmefluss J. Zur Einfachheit fassen wir die beiden Terme der terrestrischen Strahlung zusammen und linearisieren diese hinsichtlich der Strahlungstemperatur Ta:

$$R_{l,u} - R_{l,d} = R_{l,0} + k_r \cdot (T_s - T_a) \quad (8)$$

wobei Rl,0 ein konstanter Term ist (mit etwa Rl,0 = 73 W m^{-2} für heutige Bedingungen), kr = 4 σ Ta^3 mit σ = 5.67 x 10^{-8} W m^{-2} K^{-4} (die Stefan-Boltzmann Konstante), und Ta = 255K die Strahlungstemperatur der Erde ist.

Kombiniert man nun **Gleichungen (7)** und **(8)**, dann kann man die Abnahme der Oberflächentemperatur mit zunehmenden Wärmefluss J direkt sehen (**siehe auch Abbildung 5b**):

$$T_s = T_a + \frac{R_s - R_{l,0} - J}{k_r} \quad (9)$$

Nutzt man diesen Ausdruck und fügt ihn in die Carnot Grenze (Gleichung 6) ein, so erhält man einen Ausdruck für die Leistung, der näherungsweise quadratisch mit dem Wärmefluss variiert:

$$G = J \cdot \frac{R_s - R_{l,0} - J}{k_r T_s} \quad (10)$$

Dieser Ausdruck hat ein klares Maximum in der Leistung (**Abbildung 5b, schwarze Linie**), welches näherungsweise bei einem optimalen Wärmefluss von

$$J_{opt} = \frac{R_s - R_{l,0}}{2} \quad (11)$$

erreicht wird.

Mit der Annahme, dass die Konvektion an der Grenze von maximaler Leistung operiert, erhält man nun eine Schließung der Energiebilanz. Mit gegebenen Werten von absorbierter Solarstrahlung (Rs) und Stärke des Treibhauseffekts (welches den Parameter Rl,0 beeinflusst) kann man nun die weiteren Terme der Energiebilanz sowie die Oberflächentemperatur erhalten.
Die weitere Aufteilung des optimalen Wärmeflusses in den Anteil von fühlbarer Wärme H (also Aufstieg erwärmter Luft) und latenter Wärme L E (Aufstieg feuchter Luft, die direkt mit der Verdunstungsrate E verbunden ist), ist relativ gut bestimmt durch zwei Verhältnisse, die mit mikrometeorologischen Größen zusammenhängen. Im globalen Mittel balanciert die Verdunstung den Niederschlag, sodass wir über diese thermodynamische Beschreibung auch in erster Ordnung die Stärke des Wasserkreislaufs bestimmen können.

So erhält man eine erste, grobe Beschreibung des Klimazustands der Erde und wie sie durch Energieumwandlungen und durch Thermodynamik bestimmt wird. Solarstrahlung wird an der wärmeren Erdoberfläche absorbiert, während diese der Erde zugeführten Energie von der kälteren Atmosphäre ins Weltall emittiert wird. Die damit verbundenen Unterschiede in der Temperatur erlauben es der Atmosphäre, wie ein Kraftwerk aus einem Teil der Erwärmung freie Energie zu erzeugen, welche die Konvektion in Schwung hält und den damit verbundenen Wasserkreislauf. Diese Beschreibung kann den Klimazustand sowie die Sensitivität zum Klimawandel sehr gut die charakteristischen Muster aus hochkomplexen Klimamodellen beschreiben (z. B., Kleidon und Renner 2013, 2017).

Die Atmosphäre arbeitet dabei an ihrer Leistungsgrenze, die durch die Thermodynamik und durch Wechselwirkungen bestimmt wird. Dies führt insgesamt dazu, dass die Atmosphäre vergleichsweise wenig freie Energie erzeugt, da der Temperaturunterschied, der den Carnot'schen Wirkungsgrad bestimmt, gering ist. Die gleiche Beschreibung kann ebenfalls auf die großskalige atmosphärische Zirkulation angewandt werden, die Wärme aus den Tropen in die gemäßigten Breiten transportiert.

Auch diese arbeitet an ihrer Leistungsgrenze, aber insgesamt transportiert sie weniger Wärme als die Konvektion, da die vertikalen Energieflüsse wesentlich größer sind als die horizontale Verteilung.

So werden aus der eingehenden Solarstrahlung von etwa 175 000 x 10^{12} W lediglich ein paar Prozent von maximal 5000 - 6000 x 10^{12} W an physikalischer freier Energie im Erdsystem erzeugt. Diese Erzeugung hält die Luft in Bewegung und treibt den Wasserkreislauf an. Beide Prozesse wandeln Energie dann weiter um, zum Beispiel, um die Bewegung des Ozeans aufrecht zu erhalten, bevor sie letztendlich durch Reibung wieder in Wärme umgesetzt wird.

Der Beitrag von geologischen Prozessen wie Mantelkonvektion, Plattentektonik, kontinentale Hebung und Erdbeben ist wesentlich geringer, da der gesamte Antrieb des Erdinneren durch den geothermischen Wärmefluss von etwa 50 x 10^{12} W sehr viel kleiner ist als der Antrieb durch die Sonne.

Ein vergleichsweiser geringer Teil wird durch physikalische Prozesse in chemische freie Energie umgewandelt. Zum einen gibt es in der Stratosphäre photochemische Prozesse, die mit hochenergetischer ultravioletter Strahlung das Sauerstoffmolekül aufbrechen. Dies führt zur Produktion von Ozon. Die Lebensdauer ist allerdings sehr kurz, weil Ozon wiederum durch ultraviolette Strahlung aufgebrochen wird. Ebenso werden durch Gewitter durch die starke Erwärmung nach Blitzen Stickoxide produziert. Da Gewitter mit feuchter Konvektion verbunden sind, ist die damit verbundene Energie an die Stärke des Wasserkreislaufs gekoppelt. Auch wird bei der Verdunstung von Meerwasser dieses Wasser destilliert, sodass es im Kontakt mit der kontinentalen Kruste Verwitterungsreaktionen antreiben kann. Die dabei umgesetzten Energiemengen sind in der Größenordnung von 10 x 10^{12} W oder kleiner und damit vergleichsweise gering verglichen zu der Erzeugung von physikalischer freier Energie.

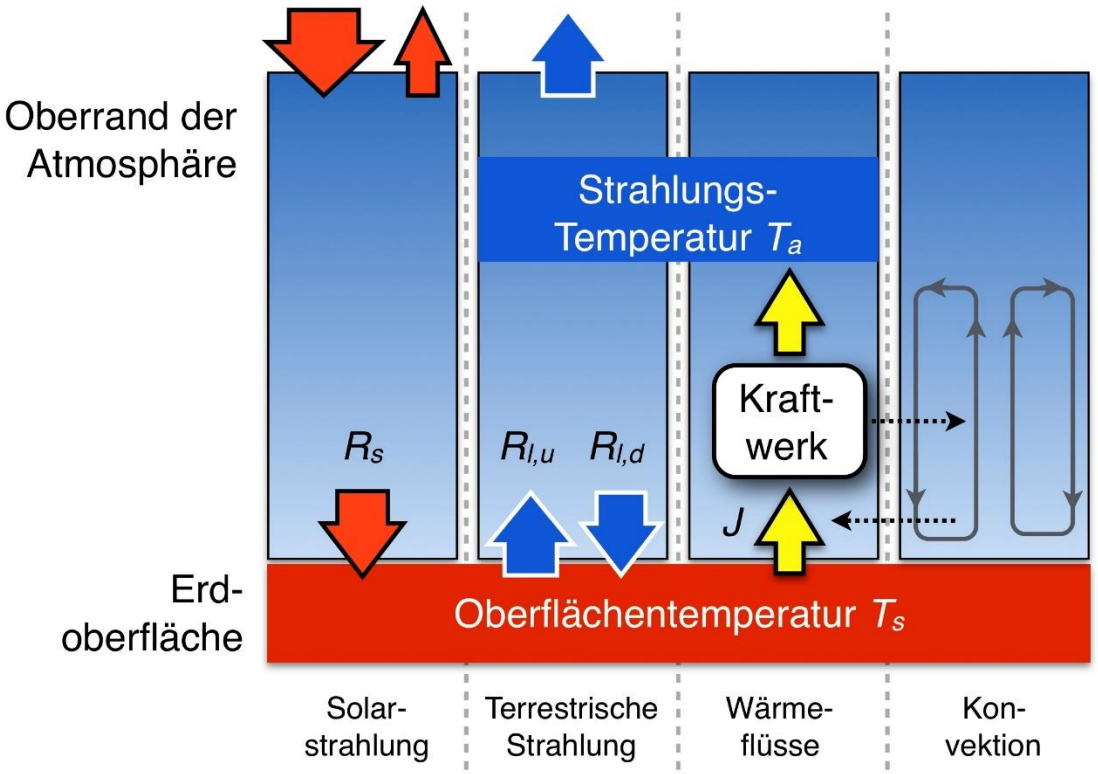
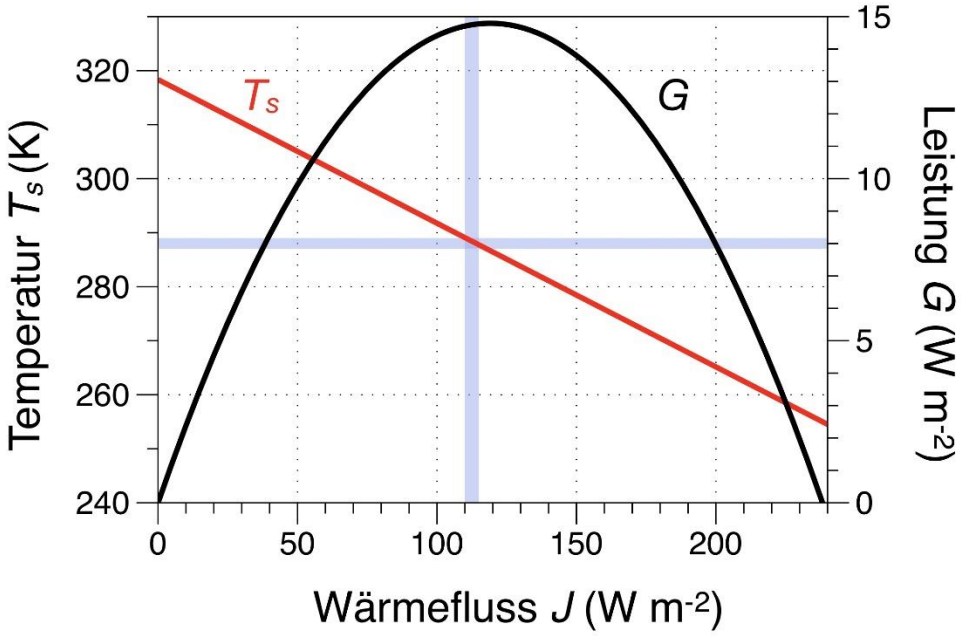
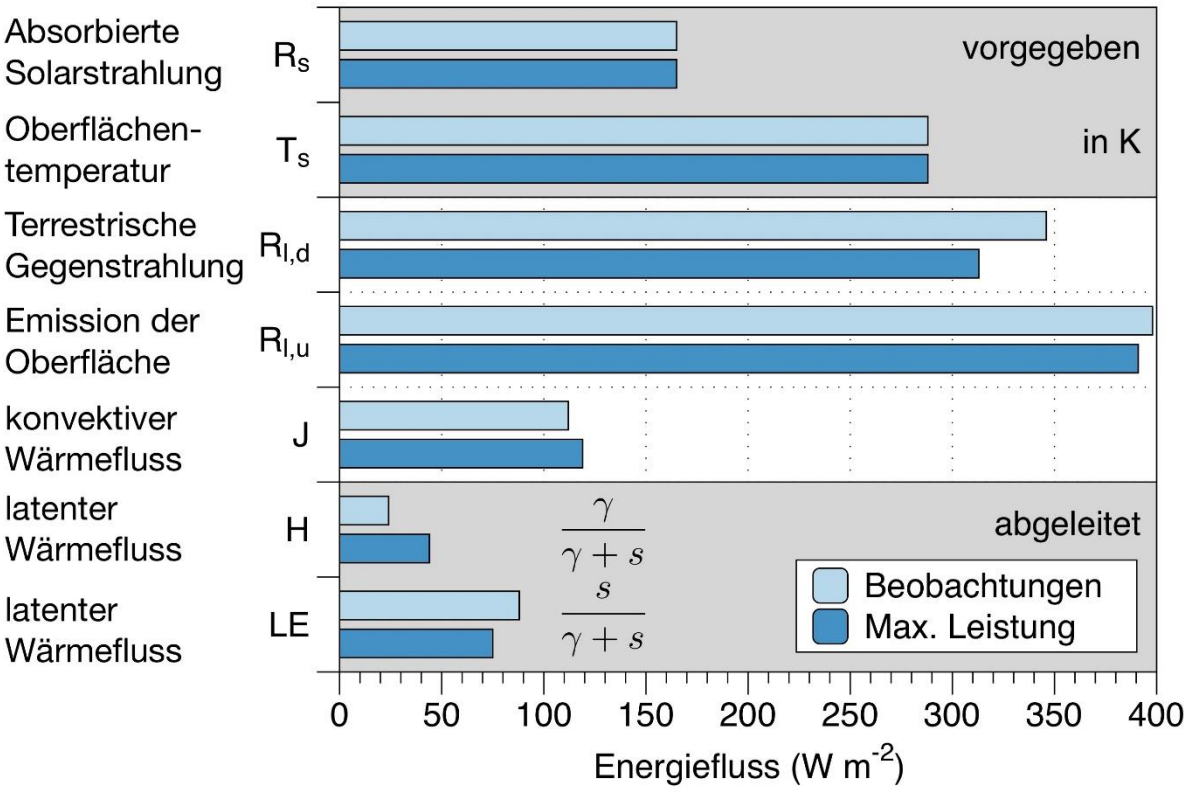


Abbildung 5: Beschreibung der vertikalen Luftbewegung (Konvektion) als das Ergebnis eines „Kraftwerks“ (a., oben), welches aus dem Erwärmungsunterschied zwischen Oberfläche und Atmosphäre Energie gewinnt, um Luftbewegung zu erzeugen. Die Kombination der Hauptsätze der Thermodynamik führen zu einer grundsätzlichen Grenze, wie viel freie Energie erzeugt werden kann. (b., mittig) Je größer der Wärmefluss, der in das „atmosphärische Kraftwerk“ fließt, desto besser wird die Oberfläche gekühlt (rote Linie), sodass sich ein Maximum der Leistung ausbildet (schwarze Linie).

Die aus der maximalen Leistung abgeschätzte Aufteilung der Energieflüsse an der Oberfläche entspricht dabei recht gut den Beobachtungen (blau markierte Bereiche in b.; und c., unten).





γ: Psychrometrische Konstante
s: Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve (de_{sat}/dT)

3.2 Biologische Energieumwandlungen

Mit der Photosynthese hat das Leben einen Prozess geschaffen, der wesentlich effektiver Solarstrahlung als Energiequelle für chemische Energie nutzen kann. Im Gegensatz zum Kraftwerk nutzt Photosynthese das Sonnenlicht direkt, also bevor es in Wärme umgewandelt wird. Es nutzt die Energie des Lichts, um Wasser erst in seine Bestandteile von Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten und dann elektrische Energie aus der Ladungstrennung von Proton und Elektron vom Wasserstoffatom zu erzeugen. Im Prinzip kann auch die Absorption von UV Licht die Ladungstrennung bewerkstelligen. Die Photosynthese führt die Ladungstrennung aber wesentlich kontrollierter durch und nutzt dafür 8 bis 10 Photonen aus dem Wellenbereich des sichtbaren Lichts. Die entstandene elektrische Energie wird dann in mehreren Schritten dafür genutzt, sie in langlebigen Kohlehydraten in chemischer Form anzulegen, wobei Sauerstoff in the Atmosphäre abgegeben wird. Somit erzeugt Photosynthese chemische Energie, und das damit verbundene thermodynamische Nichtgleichgewicht spiegelt sich in den erzeugten Kohlehydraten und dem freigesetzten Sauerstoff wider.

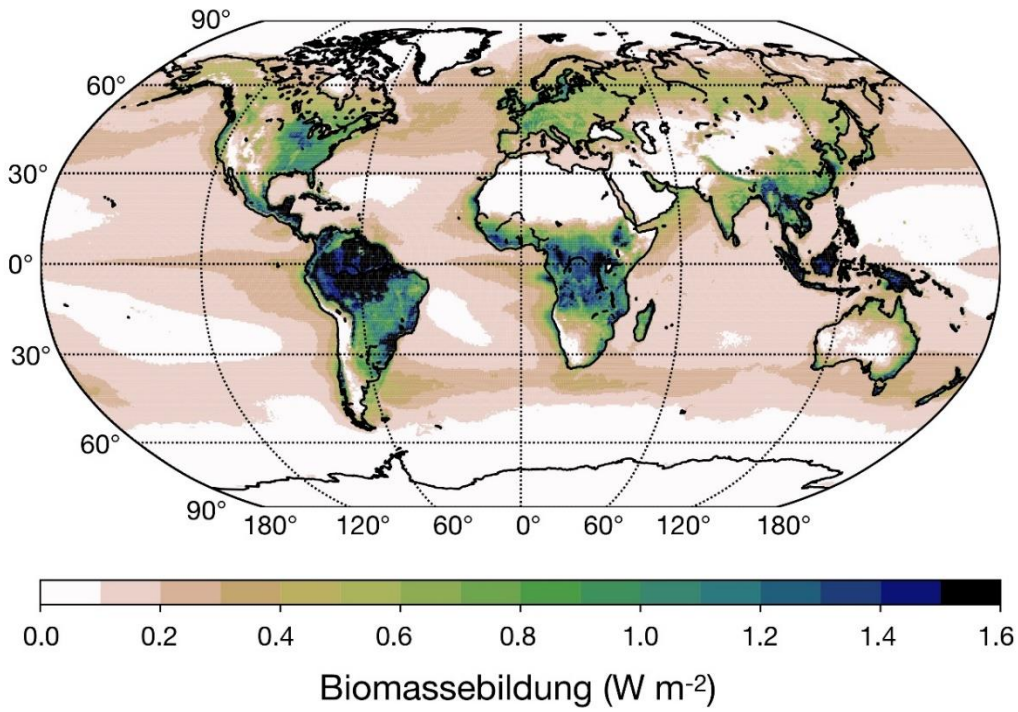
Auf der planetaren Skala wird so in etwa 220 x 10^{12} W durch die Photosynthese an chemischer Energie erzeugt, was wesentlich mehr chemische Energie erzeugt als die abiotischen Prozesse des Erdsystems. So werden auch die damit verbundenen Stoffkreisläufe von Kohlenstoff und Stickstoff durch die Aktivität der Biosphäre dominiert. Deshalb werden die daraus resultierenden Vorwärts- und Rückwärtsumwandlungen auch allgemein als biogeochemische Kreisläufe bezeichnet. Sie sind geprägt aus der Kombination von chemischen Umwandlungen, geophysikalischen Transport, und der Dominanz biologischer Aktivität.

Etwa die Hälfte dieser chemischen Energie verbrauchen die Produzenten selbst, um ihren Metabolismus zu erhalten und um Biomasse aufzubauen. Die erzeugte Biomasse stellt dann den wesentlichen Teil der Energiequelle dar, die Konsumenten in Nahrungsnetze von Ökosystemen erhält. Dabei verbrauchen die Konsumenten nicht nur die freie Energie, die durch Photosynthese erzeugt wurde. Sie wandeln Biomasse um und setzen dabei die Nährstoffe wieder frei, die die Produzenten für Biomassebildung benötigen. Somit bilden sich natürliche Ökosysteme von hoher Komplexität, die sich in Artenreichtum, Interaktionen, hohen Photosyntheseraten und Nährstoffumsätzen ausprägen (z. B. Odum 1969). Die umgewandelte Energie aus der Solarstrahlung spielt dabei die zentrale Rolle.

Wenn wir den Photosyntheseprozess in der natürlichen Umwelt aus thermodynamischer Sicht ansehen, dann fällt auf, dass er trotz der komplex ausgebildeten Ökosysteme eine vergleichsweise geringe Effizienz vorweist. Messungen zeigen, dass selbst im besten Fall, wenn Wasser und Nährstoffe nicht limitieren, nur bis zu 3% der Energie des Sonnenlichts von der Photosynthese genutzt werden können, wovon dann etwa die Hälfte zur Bildung von Biomasse beiträgt.

Ferner wird die biotische Aktivität in vielen Regionen durch die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit weiter reduziert (**Abbildung 6a**). In weiten Teilen des Ozeans ist die Produktivität durch den Transport von nährstoffreichen Wassers aus der Tiefe an die Oberfläche limitiert. Dieser Transport wird durch Mischung von Ozeanwasser bewerkstelligt, welche überwiegend durch die Winde an der Oberfläche angetrieben wird. So ist die marine Produktivität stark an die Stärke von physikalischen Transportprozessen gekoppelt, die wiederum durch die Thermodynamik limitiert sind. Über Land spielt die Wasserverfügbarkeit eine Schlüsselrolle für die Produktivität. Um Kohlendioxid aus der Luft aufzunehmen, verlieren Pflanzen Wasser durch Verdunstung, sodass die Produktivität der Biosphäre stark an die Verdunstung gekoppelt ist (**Abbildung 6b**). Da die Verdunstung wiederum an die Stärke der Konvektion gekoppelt ist, wie bereits oben dargestellt, so ist letztendlich die terrestrische Produktivität auch an die physischen Energieumwandlungen und durch die Thermodynamik limitiert.

Global betrachtet kann das Leben so nur einen sehr kleinen Teil von weniger als 1% der Solarstrahlung in chemische freie Energie umwandeln, wovon ein noch kleinerer Anteil in die Erzeugung von Biomasse angelegt wird. Mit diesem Anteil werden dann nicht nur die schon erwähnten natürlichen Nahrungsnetze betrieben, sondern er dient auch als Energiequelle für die Menschheit, auf die wir gleich näher eingehen werden.]



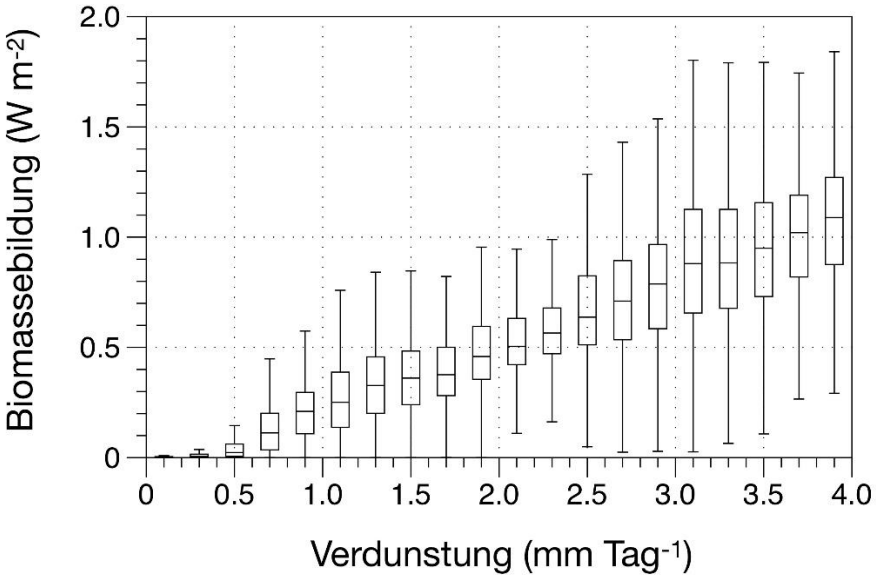


Abbildung 6: Biomassebildung, oder Nettoprimärproduktion, der Biosphäre (oben), ermittelt aus Satellitendaten und dargestellt als Erzeugungsrate an chemischer freien Energie in Form von Biomasse. Über Land ist die Nettoprimärproduktion durch den Gasaustausch stark an die Verdunstung gekoppelt, die wiederum durch Solarstrahlung, Thermodynamik, und Niederschlag limitiert ist (Kleidon et al 2014). (Die Daten für die Erstellung von Abbildung 6 (oben) wurden von folgenden Webseiten bezogen: Ozean: http://orca.science.oregonstate.edu/2160.by.4320.monthly.hdf.vgpm.m.chl.m.sst.php Land: https://nacp-files.nacarbon.org/nacp-kawa-01/)

3.3 Relevanz des Systemblicks

Ich möchte kurz diese thermodynamische Sicht des Erdsystems zusammenfassen. Die Anwendung der Thermodynamik ist hierbei vergleichsweise schlicht. Es handelt sich bei der Erde um ein thermodynamisches System fern vom Gleichgewicht, und dieser Zustand wird durch den gewaltigen Entropieunterschied zwischen eingehender Solarstrahlung und emittierter terrestrischer Strahlung aufrecht erhalten. Die Komplexität des Systems entsteht dadurch, dass aus Sonnenlicht verschiedene Formen von Energie und Entropie entstehen, eingebettet in Umwandlungssequenzen, verbunden mit

entsprechenden Dynamiken, und diese Dynamiken verändern die Strahlungseigenschaften und Energieverteilung im System. Dadurch werden thermodynamische Grenzen geformt, die der Entwicklung der Dynamik und damit der Intensität der Energieumsätze Grenzen setzt.

Während dies auf der Basis der Thermodynamik geschieht und an sich wenig Überraschung bietet, sind dabei insbesondere zwei Aspekte bemerkenswert: Der erste Aspekt ist die zentrale Rolle von Wechselwirkungen und Kopplungen im System. Diese verändern die Bedingungen an der Systemgrenze und diese Effekte spielen eine zentrale Rolle. Dies wurde hier bezüglich der Leistung bei der Konvektion veranschaulicht, wo die konvektive Luftbewegung mit der Oberflächentemperatur wechselwirkt. Diese Eigenschaft unterscheidet sich von der klassischen Thermodynamik, in der die Bedingungen an der Systemgrenze typischerweise fest vorgegeben sind. Ein Beispiel für Kopplung ist die enge Verbindung von Luftbewegung und Wasserkreislauf. Luftbewegung tauscht die befeuchtete Luft der Oberfläche mit trockener Luft aus oberen Luftschichten aus und hält damit Verdunstung und Niederschlag aufrecht. Es sind also nicht nur die Phasenübergänge, die den thermodynamischen Charakter des Wasserkreislaufs prägen, sondern ebenso bedeutsam ist die intensive Kopplung mit Luftbewegung, die wiederum von der Freisetzung von latenter Wärme bei der Kondensation und Niederschlagsbildung beeinflusst wird.

Der zweite Aspekt, den ich hier herausheben möchte, ist die Feststellung, dass die Atmosphäre an ihrer Leistungsgrenze operiert. Während diese Leistungsgrenze eine Konsequenz des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ist, sagt die Thermodynamik an sich nicht aus, dass sich Luftbewegung hin zu dieser Grenze entwickeln sollte. Diese Feststellung, dass die Atmosphäre so viel leistet wie sie kann, ist also nicht trivial und lässt vermuten, dass andere Prozesse, wie biotische Aktivität, sich ebenfalls an ihre Leistungsgrenze entwickeln. Diese Vermutung wurde schon über die Jahrzehnte in der Literatur beschrieben (z. B. Lotka 1922a, b; Odum und Pinkerton 1955). Eine solche Entwicklung legt die Deutung nahe, dass Systeme durch ihre Leistung so komplex werden, dass sie letztendlich nur noch durch thermodynamische Grenzen geprägt werden. Da man diese Grenzen vergleichsweise einfach beschreiben kann, erzeugt dies dann einfaches Systemverhalten als emergente Eigenschaft.

4 Was macht die Menschheit?

Wenn wir jetzt zur Rolle der Menschheit in diesem Bild von Thermodynamik und Energieumsätzen im Erdsystem kommen, dann ist der Ausgangspunkt der Energiebedarf der Menschheit. Dieser besteht aus zwei Teilen: Zum einen braucht die Menschheit Energie wie jedes Lebewesen, um den metabolischen Energieverbrauch der Körperzellen zu versorgen. Ausgehend von einem durchschnittlichen Energiebedarf von etwa 100 W an metabolischer Energie pro erwachsener Person (entsprechend einer Diät von 2000 kcal/Tag) und einer Weltbevölkerung von etwa 7 Milliarden Menschen führt dies zu einem Energiebedarf von 0.7×10^{12} W. Diese Energie wird in Form von Nahrung über Landwirtschaft aus der Photosynthese angeeignet. Allerdings besteht Biomasse hauptsächlich aus Zellulose, die vom Menschen nicht verdaut werden kann, sodass nur ein vergleichsweise geringer Anteil der Biomasse als Nahrungsmittel dient. Außerdem führt die Erzeugung von tierischen Nahrungsmitteln zu weiterem Energiebedarf, da ja der Metabolismus der Tiere ebenfalls erhalten werden muss und es damit zu weiteren Energieumwandlungsverlusten kommt. Beide Aspekte führt dazu, dass wesentlich mehr Energie in der Größenordnung von 8×10^{12} W aus der Photosynthese für menschliche Ernährung angeeignet wird (Haberl et al. 2007, Kleidon 2016). Flächenmäßig spiegelt sich dies in einer Landnutzung des Menschen von etwa 40% der kontinentalen Fläche wider (Foley et al. 2005).

Zusätzlich zur Ernährung hat der Mensch einen enormen Bedarf an Energie für seine sozioökonomische Aktivität entwickelt. Dieser Verbrauch ist verbunden mit der industriellen Produktion, mit Transport, und mit Energieverbrauch in Haushalten und Gewerbe. Dieser Verbrauch ist typischerweise mit Technologie verbunden. Im weiteren Sinne kann man diesen Energieverbrauch durch menschlich erzeugter Technologie als eine Externalisierung von Arbeit betrachten. Mit dieser externalisierten Arbeit können Äcker schneller bewirtschaftet werden, zusätzliche Düngemittel können

industriell gefertigt werden, und Produkte können schneller transportiert und verteilt werden. Dies hat zum Beispiel zu enormen Effizienzsteigerungen in der Landwirtschaft geführt (z. B. Smil 1999). Auf globaler Skala beträgt dieser Energieverbrauch 18 x 10^{12} W und wird weitestgehend durch fossile Energieträger bestritten (z. B. BP 2018). Fossile Energieträger, Kohle, Erdöl und Erdgas, speichern chemische freie Energie in Form von Kohlenwasserstoffen, die über Millionen von Jahren in der Erdgeschichte durch die Biosphäre produziert wurden, aber durch geologische Prozesse vom Kontakt mit Sauerstoff und der Oxidation abgeschlossen wurden und sich in der Lithosphäre angesammelt haben. Durch menschliche Technologie werden sie aus den geologischen Lagerstätten gebracht und durch Oxidation zur Energieversorgung genutzt. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff aus der Atmosphäre verbraucht, Kohlendioxid freigesetzt, und das ursprüngliche chemische Nichtgleichgewicht abgebaut. Die Freisetzung von Kohlendioxid hat seit der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhunderts zur Erhöhung des Kohlendioxidgehalts von 280 ppm auf über 400 ppm in der Atmosphäre geführt, den atmosphärischen Treibhauseffekt erhöht, und damit zur gegenwärtigen Erderwärmung geführt.

Die Rolle der Menschheit im Erdsystem ist gegenwärtig somit durch den Verbrauch von Energie geprägt, die von der Erde durch die Photosynthese erzeugt wird (Nahrungsmittel) oder erzeugt wurde (fossile Energieträger). Dabei stellen wir fest, dass die Größenordnung des Energieverbrauchs gewaltig ist und mit anderen Erdsystemprozessen vergleichbar ist (**Abbildung 7**). Diese Tatsache ist das Kernproblem für die gegenwärtigen globalen Umweltprobleme. Die Menschheit verbraucht Energie, aber trägt nicht zu ihrer Erzeugung bei. Von der Photosynthese wird ein substantieller Anteil durch Landwirtschaft entzogen, sodass natürlichen Ökosystemen weniger Energie bleibt. Durch die Verbrennung fossiler Energieträger wird ein Zustand des thermodynamischen Nichtgleichgewichts rasant abgebaut, welches die Biosphäre über Jahrmillionen aufgebaut hat. Dieser Energieentzug ist durch den Pfeil von chemisch freier Energie zur Menschheit hin in **Abbildung 7** dargestellt. Somit lebt die Menschheit zurzeit auf Kosten des Erdsystems, und schwächt die Fähigkeit der Erde, Energie zu erzeugen. Es beschreibt also einen Zustand, der nicht nachhaltig ist.

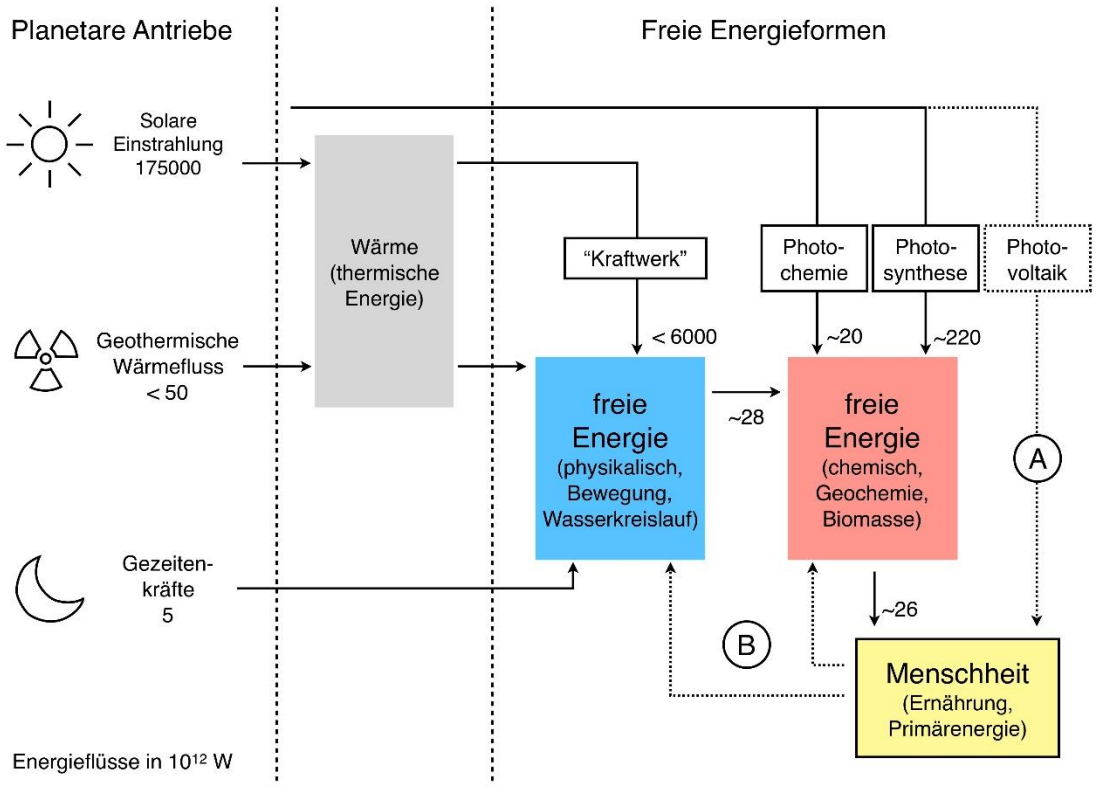


Abbildung 7: Zusammenfassung von Energieerzeugungsraten im Erdsystem im Vergleich zu dem Energieverbrauch der Menschheit. Auf die gepunkteten Linien, markiert durch (A) und (B), wird im Text im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Zukunft verwiesen.

5 Ein thermodynamischer Blick auf eine nachhaltige Zukunft

Wie können wir nun aus diesem Bild heraus Lösungsansätze für eine nachhaltige Zukunft skizzieren? Der Schlüssel dazu liegt in der effektiveren Nutzung der Solarstrahlung als Energiequelle als was das physikalische Klimasystem über Wärmekraftmaschinen oder die Photosynthese über Photochemie natürlicherweise bereits erreichen. Dies kann die Menschheit mit Technologie beitragen. Die daraus gewonnene freie Energie führt dann dazu, dass insgesamt mehr freie Energie auf dem Planeten erzeugt werden kann und so die Erde leistungsfähiger ist.

Die Technologie dazu gibt es bereits, zum Beispiel in Form der Photovoltaik (**Abbildung 7, Pfeil A**). Im Vergleich zur Photosynthese haben Solarpaneele bereits eine höhere Effizienz von 20% und mehr. Sie können also wesentlich mehr der einfallenden Sonnenstrahlung in nutzbare Energie umwandeln. Innerhalb des planetaren Bilds, welches in Abbildung 2 aufgezeigt wurde, bedeutet dieser Beitrag durch menschliche Technologie, dass aus den „Prozessen, die solare Strahlung absorbieren", also des roten Kastens, durch die Absorption nicht Entropie und Wärme entstehen, sondern freie Energie. Erst bei der Nutzung durch die Menschheit wird sie dann in Wärme und Entropie umgewandelt. Bei der Photovoltaik wird also Energie direkt aus der Sonnenstrahlung gewonnen statt durch die Umwandlung in Wärme bei niedriger Temperatur und hoher Entropie verloren zu gehen. Damit steht die Photovoltaik im Gegensatz zu anderen Formen der menschlichen Energiegewinnung, die bereits umgewandelte Formen von Energie aus dem Erdsystem verbrauchen.

Wenn durch menschliche Technologie im Erdsystem mehr freie Energie erzeugt wird, dann wird sich dies auch in einer zunehmenden Aktivität von Erdsystemprozessen niederschlagen (**Abbildung 7, Pfeile B**). Die Energie kann zum Beispiel dazu genutzt werden, Meerwasser zu entsalzen. Damit steht mehr Frischwasser auf Land zur Verfügung. Es kann dazu genutzt werden, durch Bewässerung Landwirtschaft in gegenwärtig unproduktive Regionen der Erde wie Wüsten auszubreiten. Damit kann der Abholzung tropischer Regenwälder entgegengewirkt werden und dem Schutz dieser Ökosysteme beitragen. Die zusätzliche Energie könnte so nicht nur mehr Nahrung erzeugen, sondern würde mit einem gestärkten Wasserkreislauf und erhöhter Produktivität der Biosphäre einhergehen. Eine solche Begrünung der Wüsten wäre durch natürliche Prozesse nicht möglich, es bedarf dafür die vom Menschen geschaffene Technologie, um einen solchen Zustand zu erzeugen und zu erhalten.

Wie wir oben gesehen haben, entwickelt sich die atmosphärische Dynamik an ihre Leistungsgrenze von maximaler Leistung. Auch die Biosphäre ist wahrscheinlich nahe dieser Grenze, und produziert so viel chemische Energie, wie die physikalischen Transportprozesse über Wasserverfügbarkeit (auf Land) und Mischung (im Ozean) erlauben. Menschliche Technologie, wie Photovoltaik und Meerwasserentsalzung, würde diese thermodynamische Entwicklung fortsetzen und auf ein höheres Niveau von freier Energieerzeugung heben, welches durch abiotische oder biotische Prozesse nicht erreicht werden kann. Dafür bedarf es bewusster Planung, um diese Entwicklung durch die Menschheit zu ermöglichen und umzusetzen. Die Thermodynamik des Gesamtsystems Erde setzt dafür das notwendige Fundament.

Literatur:

Atkins, P, and de Paula, J. (2010): Physical Chemistry. 9th edn. Oxford University Pres, Oxford and New York.

BP (2018). BP Statistical Review of World Energy. Technical report. BP P.L.C., London, UK.

Crutzen, P. J. (2002): Geology of mankind. Nature 415, 23.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., and Snyder, P. K. (2005): Global consequences of land use. Science, 309, 570–574.

Haberl, H, Erb, K H, Krausmann, F, Gaube, V, Bondeau, A, Pluttzar, C, Gingrich, S, Lucht, W, and Fischer-Kowalski, M. (2007): Quantifying and mapping the human appropriation of net primary productivity in earth's terrestrial ecosystems. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104, 12942–12947.

Kabelac, S. (1994): Thermodynamik der Strahlung. Vieweg, Braunschweig und Wiesbaden.

Kleidon, A. (2010): Life, hierarchy, and the thermodynamic machinery of planet Earth. Physics of Life Reviews 7, 424–460.

Kleidon, A. (2012a): How does the Earth system generate and maintain thermodynamic disequilibrium and what does it imply for the future of the planet? Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 370(1962), 1012-1040. doi:10.1098/rsta.2011.0316.

Kleidon, A. (2012b): Was leistet die Erde? Physik in unserer Zeit, 43(3), 136-144. doi:10.1002/piuz.201201294.

Kleidon, A., Renner, M. (2013): A simple explanation for the sensitivity of the hydrologic cycle to surface temperature and solar radiation and its implications for global climate change. Earth System Dynamics, 4, 455-465. doi:10.5194/esd-4-455-2013.

Kleidon, A., Renner, M., Porada, P. (2014): Estimates of the climatological land surface energy and water balance derived from maximum convective power. Hydrology and Earth System Sciences, 18, 2201-2218. doi:10.5194/hess-18-2201-2014.

Kleidon, A., Renner, M. (2017): An explanation for the different climate sensitivities of land and ocean surfaces based on the diurnal cycle. Earth System Dynamics,8(3), 849-864. doi:10.5194/esd-8-849-2017.

Kleidon, A. (2016): Thermodynamic Foundations of the Earth System. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Lotka, A. J. (1922a): Contribution to the energetics of evolution. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 8, 147–151.

Lotka, A. J. (1922b): Natural selection as a physical principle. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 8, 151–154.

Lotka, A. J. (1925): Elements of Physical Biology. Williams and Wilkins, Baltimore.

Odum, E. P. (1969): The strategy of ecosystem development. Science, 164, 262–270.

Odum, H. T., und Pinkerton, R. C. (1955) Time's speed regulartor: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. American Scientist 43, 331-343.

Ostwald, W. (1909): Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaften. Klinkhardt, Leipzig.

Smil, V. (1999) Energies: An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

E-Mail des Verfassers: akleidon@bgc-jena.mpg.de