

Oliver Schwarz

Astrophysikalische Wachstumsgrenzen im Leistungsumsatz der menschlichen Zivilisation

Die Physik des Planeten Erde begrenzt den Energie- und den Leistungsumsatz der menschlichen Zivilisation. Dies kann man sich mit relativ einfachen mathematisch-physikalischen Überlegungen verdeutlichen. Der astronomische Blick auf unseren Heimatplaneten vermag einen wesentlichen Beitrag zur gegenwärtigen Energie- und Umweltdiskussion zu erbringen.

0. Einleitung

Im Jahre 1972 publizierten D. H. Meadows mit einigen Kollegen im Auftrag des Club of Rome eine Studie mit dem Titel „Die Grenzen des Wachstums“ [1]. Die Schlüsselbotschaft dieser Untersuchung lautete:

„Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht. Mit großer Wahrscheinlichkeit führt dies zu einem ziemlich raschen und nicht aufhaltbaren Absinken der Bevölkerungszahl und der industriellen Kapazität.“ ([2], S. 10)

Diese Aussage erregte große Aufmerksamkeit, führte aber *global* bis heute nicht zu einer grundsätzlichen Trendwende im Produktions- und Konsumverhalten der Menschheit. Auch das öffentliche Interesse an der Studie ließ allmählich nach. Insbesondere neue Technologien verbesserten die Effizienz der allgemeinen Naturausbeutung so drastisch, dass die im Jahre 1972 für die kommenden Jahrzehnte prognostizierte Ressourcenverknappung im ausgehenden 20. Jahrhundert noch nicht so deutlich wie befürchtet eintrat.

Mathematisch beruhten die Vorhersagen der Forscher auf der Annahme eines exponentiellen Wachstums mit konstanten Wachstumsraten in verschiedenen Bereichen der menschlichen Gesellschaft, z.B. der Weltbevölke-

rung, dem Energie-, „verbrauch“, dem Rohstoffverbrauch oder der globalen Industrieproduktion. Diese Annahme hat sich bis heute nicht in allen Bereichen als zutreffend erwiesen.

Zu den Gebieten, in denen das exponentielle Wachstum bezogen auf die gesamte Welt ungebremst anhält, zählt der Umsatz an Primärenergie. Unter Primärenergien versteht man alle natürlich vorkommenden Energieformen oder Energieträger.

Die herausragende Rolle der Bereitstellung von Energie als Wachstumsfaktor hat zu verschiedenen teilweise weit verbreiteten *Fehlvorstellungen* in Hinblick auf die weitere Entwicklung der Menschheit geführt. Zu diesen Fehlvorstellungen gehört die Annahme, man könne wesentliche Menschheitsprobleme auch zukünftig mit hinreichend großen Steigerungsraten im Einsatz von Primärenergie lösen. Im Hinblick auf die globale Erwärmung durch Treibhausgase schlägt man entweder vor, die Nutzung von Fissions- oder Fusionsenergie voranzutreiben oder die gegenwärtig genutzten fossilen Primärenergien durch regenerative Energien zu substituieren. Ein anschließender Ausbau der regenerativen Energieumwandlungen wird dann irrtümlich als nahezu unbegrenzt möglich angesehen.

Ein exaktes Ausloten von Wachstumsgrenzen im Energieumsatz der menschlichen Zivilisation stellt ein komplexes Projekt dar, das vielfältige Beeinflussungen zwischen der Geosphäre, der Biosphäre und der „ökonomischen Sphäre“ zu berücksichtigen hat. Will man für Lehrzwecke lediglich verdeutlichen, dass *überhaupt Wachstumsgrenzen* im Energieumsatz der Menschheit existieren, wählt man zweckmäßig einen Betrachtungsrahmen, in dem diese Wechselwirkungen überhaupt keine Rolle spielen. Einen solchen Betrachtungsrahmen stellen beispielsweise die planetaren Energieströme dar, die sich stets in das Strahlungsgleichgewicht der Erde einfügen müssen. Unter didaktischen Gesichtspunkten ist also der „astronomische Blick“ auf unseren Heimatplaneten besonders hilfreich.

Der anthropogene Treibhauseffekt wird nachfolgend nicht näher betrachtet. Es sei ausdrücklich betont, dass die Probleme der globalen Erwärmung infolge des anthropogen verursachten Treibhauseffektes nicht verdrängt werden sollen.

Die nachfolgend dargelegten Wachstumsgrenzen resultieren jedoch aus fundamentalen Überlegungen und besitzen deshalb einen universellen Charakter. Sie sind weder durch eine Reduktion oder Vermeidung von Treibhausgasen zu umgehen noch durch den Einsatz neuartiger Technologien. Es

sei denn, diese Technologien führen durch rigoroses Sparen dazu, dass die Wachstumsgrenzen nicht erreicht werden.

1. Astronomische Grenzen im Leistungsumsatz der Menschheit

Wir wollen nachfolgend unter einer absoluten energetischen Wachstumsgrenze ein Limit verstehen, das nicht überschritten werden kann, ohne charakteristische Eigenschaften unseres Heimatplaneten wie sein Strahlungsgleichgewicht oder seine Eigenrotation zu zerstören. So kann der Planet Erde nicht

- mit der Leuchtkraft der Sonne strahlen,
- seine Rotationsenergie verringern, ohne dass sich die Länge eines Tages vergrößert und es zu merklichen Auswirkungen auf die Drehimpulsverteilung im System Erde-Mond kommt,
- das Strahlungsgleichgewicht zwischen der an der Oberfläche ein- und ausfallenden Strahlung verletzt. Deshalb muss die Erde die von der Sonne pro Zeiteinheit kommende Strahlungsenergie auch wieder pro Zeiteinheit ins Weltall abgegeben, sofern ihre die Oberflächentemperatur konstant bleiben soll.

Aus diesen einsichtigen Grenzen resultieren Limits für die technische Nutzung entsprechender Energiequellen und damit für den menschlichen Energieumsatz insgesamt. Wir wollen nachfolgend abschätzen, wann die Menschheit diese Grenzen erreichen würde, sofern sie ihren Energieumsatz weiterhin exponentiell steigert.

Dazu unterstellen wir zwei Wachstumsraten, die aus aktuellen Statistiken und Prognosen entlehnt werden. Der Weltenergieerat (world energy council) prognostiziert zwischen den Jahren 2000 und 2030 einen mittleren Anstieg des Weltenergiebedarf um jährlich 1,8% [3]. Nach Angaben des Statistical Review of World Energie 2005 stieg die Wachstumsrate im Energieumsatz zu Beginn des 21. Jahrhunderts auf neue Höchststände und betrug z.B. für das Jahr 2004 etwa 4,3% [4]. Auf diesen Angaben fußend werden wir nachfolgend jeweils zwei Wachstumsberechnungen mit Steigerungsraten von 2% und 4% pro Jahr durchführen. Wir führen alle weiteren Rechnungen auf der Grundlage von Leistungsangaben aus.

Für jedwedes exponentielles Wachstum gilt bekanntlich eine geometrische Progression. Fragen wir uns beispielsweise, wann bei einem ungebremsten Energiewachstum von 4% jährlich und einem gegenwärtigen mittleren anthropogenen Leistungsumsatz von $1,35 \cdot 10^{13} \text{W}$ der

Weltleistungsbedarf die Leuchtkraft der Sonne ($3,8 \cdot 10^{26} \text{W}$) erreicht, dann gilt der mathematische Ansatz:

$$1,35 \cdot 10^{13} \text{W} \cdot 1,04^x = 3,8 \cdot 10^{26} \text{W} \quad (1)$$

und die Lösung hierzu ist $x=790$ Jahre.

Über die Energieentwertungskette landet früher oder später jede Energieform als thermischer „Müll“ in der Nähe der Erdoberfläche und muss dann von dort ins All abgestrahlt werden. In 790 Jahren würde also die Erde ebenso hell wie die Sonne strahlen. Natürlich ist aus einsichtigen physikalischen Gründen das Energiewachstum der Menschheit schon weitaus früher beendet. Eine jährliche Steigerungsrate von 2% führt auf einen Zeithorizont von 1564 Jahren.

Ein oberes Limit für die Nutzung der Solarenergie ist die auf der Querschnittsfläche der Erde je Sekunde einfallende Strahlungsenergie (Abb.1). Berücksichtigt man die Albedo der Erde von etwa 30 Prozent, so gelangen in der einfachsten Modellannahme etwa

$$0,7\pi R^2 s = 1,2 \cdot 10^{17} \text{W} \quad (2)$$

zum Erdboden (R: Erdradius, Solarkonstante: $s=1370 \text{W/m}^2$).

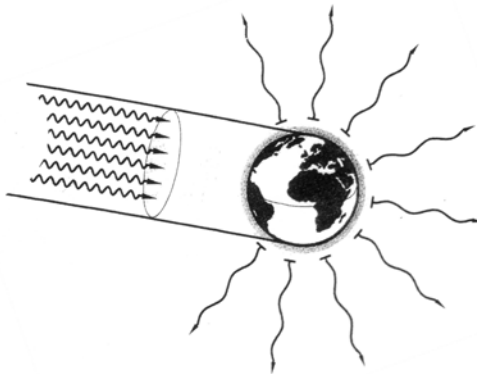


Bild 1: Die Querschnittsfläche der Erde ist der Empfänger der Sonnenenergie.

Als letzte der oben genannten Energiequellen betrachten wir noch die in der Erdrotation gespeicherte Bewegungsenergie, die über Gezeitenkraftwerke genutzt werden könnte. Sieht man die Erde näherungsweise als starre Kugel an, dann beträgt deren Rotationsenergie:

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{2}{5} M_E R^2 \omega_E^2 = 2,6 \cdot 10^{29} J \quad (3)$$

(ω_E : Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation, M_E : Erdmasse, J : Drehimpuls der Erde). Eine Dissipation der Rotationsenergie der Erde hätte dramatische Auswirkungen auf die Bewohnbarkeit unseres Heimatplaneten. Die Verlängerung eines Tages wäre ebenso eine Folge wie die Anhebung der Mondbahn infolge des Drehimpulsübertrages auf den Erdtrabanten. Wir setzten uns über diese Bedenken hinweg und „billigen“ der Menschheit zu, dass sie die Rotationsenergie der Erde *gleichmäßig* in nur 500 Jahren verbrauchen darf. Dann würde dies einer in diesem Zeitraum verfügbaren Leistung von $2,6 \cdot 10^{29} J / 500a = 1,6 \cdot 10^{19} W$ entsprechen.

Die Tabelle 1 gibt die nach dem Muster der Gleichung 2 gerechneten Zeithorizonte für alle genannten Leistungen an. Man beachte, dass hierbei nur Leistungen *verglichen* werden. Wie die jeweilige Energieform konkret gewonnen werden soll, also insbesondere auch die Frage nach dem technischen Wirkungsgrad potentieller Kraftwerke, wird nicht diskutiert. Bei Berücksichtigung auch solcher Aspekte werden die Zeithorizonte geringer.

Energieform	kosmisches Leistungs- limit für die Erde	erreicht in Jahren bei einem Wachstum von	
		4%	2%
auf der Erde ankommende Strahlungsenergie der Sonne (Solar- zellen, Sonnen- kollektoren)	Querschnittsfläche der Erdkugel als Emp- fangsfläche bei Beach- tung der Erdalbedo $1,2 \cdot 10^{17} W$	232	459
Gezeitenleistung (heute erst gering- fügig in Gezeiten- kraftwerken genutzt)	Verbrauch der Rota- tionsenergie der Erde $1,6 \cdot 10^{19} W$	357	706
gesamte Strahlungs- leistung der Sonne	$3,8 \cdot 10^{26} W$	790	1564

Tabelle 1: Kritische Zeithorizonte für einige prinzipiell nicht überschreitbare Limits im Leistungsumsatz auf der Erde

Dass exponentielles Wachstum jedwedem Limit durchbricht, ist eine mathematische Trivialität, dass ein solches Wachstum schon in historisch kurzer Zeit jede astronomischen Grenzen des Planeten Erde sprengt, ist hingegen eine überraschende Tatsache.

Ein Grund für die relativ langen Zeithorizonte sind die im Modell genutzten hohen Leistungslimits, die alle auf die physikalische Zerstörung der Lebensgrundlagen auf der Erde hinauslaufen. Durch eine fundiert begründete Wahl kleinerer Limits kann man die Zeithorizonte deutlich verkürzen. Allerdings ist es hierzu notwendig, die Wirkungen verschiedener Energieformen auf das globale Strahlungsgleichgewicht zu beschreiben.

2. Der Strahlungsantrieb – ein Grundbegriff der Klimatologie

Die aktuelle Klimaforschung bedient sich des Konzepts des Strahlungsantriebes recht umfangreich, insbesondere dann, wenn es darum geht, mögliche Folgen verschiedener Strahlungsantriebe abzuschätzen. Zum Strahlungsantrieb heißt es in den Veröffentlichungen des IPCC#:

„Änderungen in der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, der Sonneneinstrahlung und der Beschaffenheit der Landoberfläche verändern die Energiebilanz des Klimasystems. Diese Änderungen werden in Form des Strahlungsantriebes ausgedrückt, mit dessen Hilfe die wärmenden und kühlenden Einflüsse einer Anzahl von menschlichen und natürlichen Antrieben auf das globale Klima verglichen werden.

Der Strahlungsantrieb ist ein Maß für den Einfluss, den ein Faktor auf die Änderung des Gleichgewichts von einfallender und abgehender Energie im System Erde-Atmosphäre hat, und ist ein Index für die Bedeutung eines Faktors als potentieller Mechanismus einer Klimaänderung. Ein positiver Antrieb führt tendenziell zur Erwärmung der Erdoberfläche während ein negativer Antrieb tendenziell zu einer Abkühlung führt.“ ([5], S. 2)

Aus physikalischer Sicht sei dieser Definition noch hinzugefügt, dass es sich beim Strahlungsantrieb um eine physikalische Größe handelt, die eine Strahlungsleistung pro Flächeneinheit (Wm^{-2}) darstellt. Für das Verständnis des Konzeptes des Strahlungsantriebes müssen zwei Umstände besonders hervorgehoben werden:

Erstens werden keine Rückkopplungen berücksichtigt, zu denen es im realen nichtlinearen Klimasystem mit Sicherheit kommt. Daher wird in der Definition besonders betont, dass man einzelne Strahlungsantriebe lediglich als *potentielle* Mechanismen einer Klimaänderung ansehen darf. Zweitens sind alle Zahlenwerte für die Strahlungsantriebe auf das Referenzjahr 1750 bezo-

gen, was natürlich den Sinn hat, die anthropogenen Einflüsse seit dieser Zeit besonders herauszustellen.

Das komplexe Wechselspiel von eingehender und abgehender Strahlungsleistung im System Erde-Atmosphäre verdeutlicht man sich an einem einfachen Atomsphärenmodell ([6], Bild 2). Die Strahlungsenergie S , die jede Sekunde in die Erdatmosphäre eindringt, wird beim Durchlaufen der Gashölle der Erde geringfügig (also ein relativ großer Faktor τ) geschwächt und trifft auf den Boden. Der Boden emittiert je Sekunde die Strahlungsenergie S_B , von der nur noch der Teil $S_B\tau^*$ an der Oberseite der Atmosphäre ankommt. Und die Atmosphäre selbst emittiert in Richtung Boden und Weltraum je Sekunde die Wärme S_A .

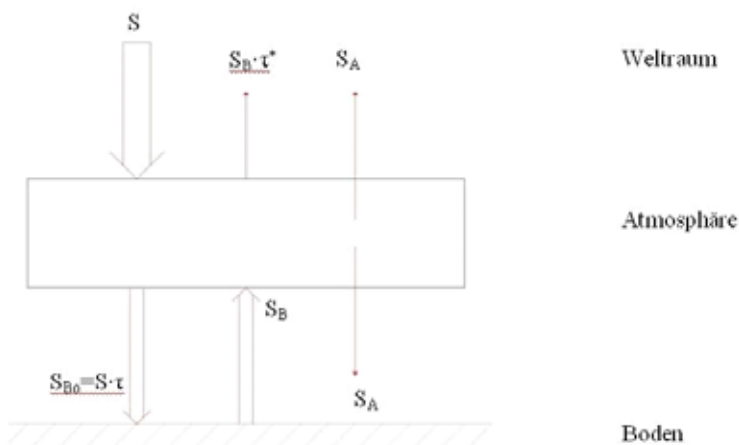


Bild 2: Die Energieflüsse in der Erdatmosphäre

Entscheidend ist: Damit sich ein Gleichgewicht einstellt, müssen die Energie- bzw. Strahlungsbilanzen ausgeglichen sein – und zwar am Boden, innerhalb sowie oberhalb der Atmosphäre. Ganz einfach gesagt, die nach oben und nach unten gerichteten „Strahlungspfeile“ müssen in der Summe stets eine „0“ ergeben.

Bringt man beispielsweise durch anthropogene Emissionen mehr Treibhausgas in die Atmosphäre, dann verkleinert sich τ^* , sodass der „Pfeil“ $S_B\tau^*$ an der Obergrenze der Atmosphäre schmaler wird. Da aber die Wärme in der Atmosphäre stecken geblieben ist und sich deren Temperatur deshalb erhöht

hat, strahlt unsere Gashölle auch allseitig mehr Wärme ab. Der nach oben gerichtete Wärmestrom S_A nimmt gerade um so viel zu, dass die Bilanz an der Oberseite der Atmosphäre wieder ausgeglichen ist. Doch durch die Erhöhung der Atmosphärentemperatur hat sich natürlich auch der zum Boden gerichtete Anteil S_A erhöht. Damit die Bilanz am Boden wieder stimmt, muss von unten mehr Wärme S_B abgestrahlt werden. Das geht aber nur, wenn sich die Temperatur am Erdboden erhöht. Der Strahlungsantrieb, der diese Temperaturerhöhung auslöst, wäre in diesem Fall ursächlich der *zusätzlich* in der Atmosphäre absorbierte Strahlungsanteil.

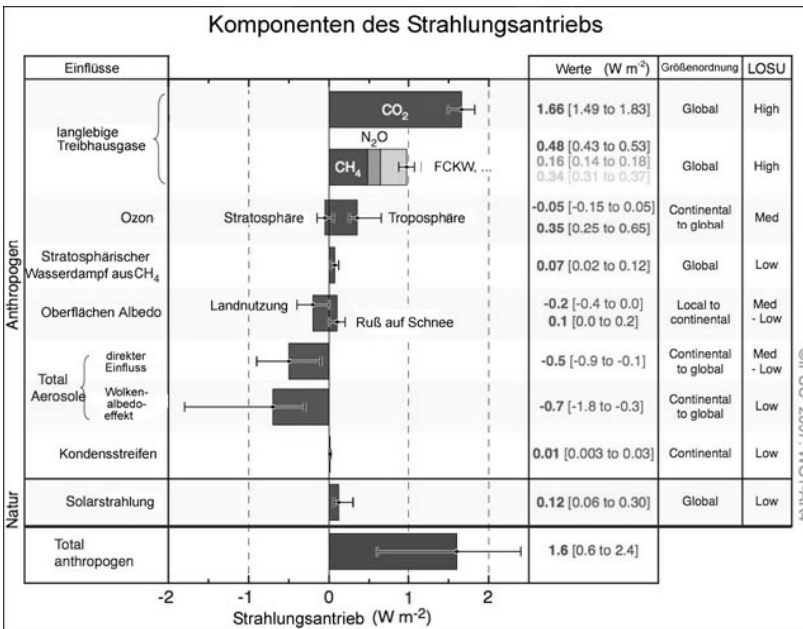


Bild 3: Typische Strahlungsantriebe für das Jahr 2005, bezogen auf das Referenzjahr 1750; der solare Strahlungsantrieb beinhaltet nur die vergleichsweise kurzperiodischen Änderungen der Sonnenaktivität Quelle: [5]

Das hier betrachtete Atmosphärenmodell zählt zu den einfachsten Modellen; und man beginnt ansatzweise zu verstehen, wie kompliziert die wechselseitigen Abhängigkeiten in den wesentlich komplexeren Modellrechnungen der Klimatologie sind und wie viele Möglichkeiten es gibt, dass sich Strahlungsflüsse verändern können. Genau dies wird im IPCC-Bericht zusammenge-

fasst (Bild 3) und genau hier endet die Möglichkeit für Außenstehende, sowohl die Größenordnung der Zahlenwerte als auch wechselseitige Abhängigkeiten der einzelnen physikalischen Größen nachzuvollziehen.

Allerdings gibt es hierbei eine wesentliche Ausnahme: Kosmische Strahlungsantriebe sind der Erde *von außen* aufgeprägt und können deshalb relativ leicht analysiert werden. Die folgenden Überlegungen beabsichtigen, das Konzept des Strahlungsantriebes auf elementare Weise zu verdeutlichen. Wir bedienen uns hierbei einer *Ähnlichkeit*, die zwischen den Begriffen der Solarkonstante und dem Strahlungsantrieb besteht und interessieren uns für die die folgenden, naheliegenden Fragen:

Der IPCC-Bericht nennt einen durch Menschen verursachten Strahlungsantrieb von $1,6 \text{ Wm}^{-2}$. Was bedeutet dieser Zahlenwert? Ist dieser Strahlungsantrieb gering oder beträchtlich? Welche Temperaturänderungen in der Erdatmosphäre könnten sich daraus ergeben?

3. Von der Solarkonstante zum Strahlungsantrieb

Von der gesamten Strahlungsleistung der Sonne (die oft auch als Leuchtkraft bezeichnet wird) interessiert uns nur derjenige Teil, der die Erde trifft. In der Astronomie und der Geophysik rechnet man deshalb statt mit dieser Strahlungsleistung zweckmäßiger mit der sogenannten Solarkonstante s .

Unter der Solarkonstante versteht man die von der Sonne stammende Strahlungsenergie, die im mittleren Abstand Erde-Sonne senkrecht je Sekunde und Einheitsfläche (1 m^2) auftrifft, s ist also eine Strahlungsleistung pro Fläche.

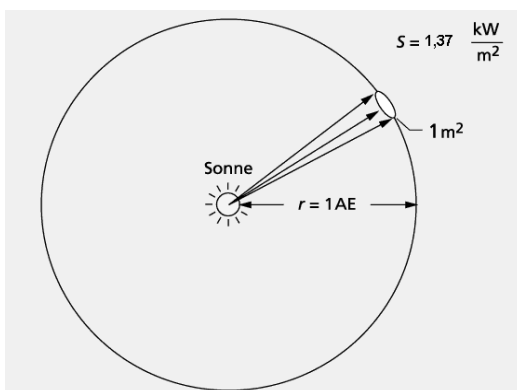


Bild 4: Zur Bestimmung der Solarkonstante

Umgibt man die Sonne gedanklich mit einer Kugel mit dem Erdbahnradius r und geht davon aus, dass diese Kugel von der gesamten Sonnenstrahlungsleistung L durchströmt wird, dann ist der Strahlungsanteil, der auf einen Quadratmeter auftrifft, gerade (siehe Bild 4):

$$s = \frac{L}{4\pi r^2} . \quad (4)$$

Ausgangspunkt für *alle weiteren* Betrachtungen ist das thermodynamische Gleichgewicht der Erde: Die thermische solare Einstrahlung von der Sonne auf die Erde und die thermische Ausstrahlung von der Erde in den Weltraum müssen in gleichen Zeiteinheiten auch gleich groß sein. Für ein globales Gleichgewichtsmodell müssen wir die je Sekunde auf der Querschnittsfläche πR^2 der Erde ankommende Energie gleichmäßig auf die gesamte Erdoberfläche verteilen, mithin auf die Fläche $4\pi R^2$ (Bild 1), die gerade *vier Mal* so groß wie die Querschnittsfläche ist.

Die Erde streut einen Teil der zu ihr gelangenden Sonnenstrahlung so gleich wieder ins All zurück. Das Rückstreuvermögen eines Himmelskörpers bezeichnet man als Albedo A . Die Albedo der Erde beträgt 0.3, d.h. rund 30% der Sonnenstrahlung gelangen wieder ins Weltall, ohne dass sie auf der Erdoberfläche oder in der Erdatmosphäre absorbiert werden. Berücksichtigt man diesen Effekt, so erhält man für die im Mittel je Quadratmeter und Zeiteinheit auf die Oberseite der Erdatmosphäre treffende Strahlungsenergie S den Zusammenhang:

$$S = \frac{1}{4}(1 - A)s. \quad \text{bzw. } S=0,175s \quad (5)$$

Aus den Zahlenwerten für die Solarkonstante und die Erdalbedo folgt, dass der mittlere Strahlungseintrag pro Quadratmeter Erdoberfläche gerade $S=240\text{Wm}^{-2}$ beträgt. Da der Strahlungsantrieb definitionsgemäß eine *Änderung* des Strahlungsflusses bedeutet, fragen wir, wie sich kleine Änderungen der Solarkonstante s auf den Strahlungseintrag S auswirken. Da der Zusammenhang zwischen beiden Größen linear ist, ergibt sich einfach $\Delta S = 0,175\Delta s$. ΔS wäre ein Strahlungsantrieb, der durch die *Änderung* der Solarkonstante Δs bedingt wäre. Wie man seit einigen Jahren recht genau weiß, gibt es kleine Änderungen der Solarkonstante tatsächlich – sie sind in physikalischen Vorgängen auf der Sonne begründet und werden im IPCC-Bericht auch entsprechend berücksichtigt (Bild 3).

Eine konstante mittlere Temperatur an der Erdoberfläche bildet sich deshalb heraus, weil die Erde genau diejenige Strahlungsenergie, die sie in einer

bestimmten Zeit von der Sonne empfängt, in der gleichen Zeit auch wieder abstrahlt. Letzteres geschieht entsprechend dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, sodass wegen der Gleichheit zwischen dem Strahlungsein- und -austrag gilt:

$$(1 - A)\pi R^2 s = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (6)$$

Setzt man in die Gleichung (6) die Zahlenwerte für die Albedo A und für die Stefan-Boltzmann-Konstante σ ein, so ergibt sich der Zusammenhang

$$T^4 = 3,1 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{K}^4 \text{m}^2}{\text{W}} \right] \cdot s \quad (7)$$

Für die Temperatur T in Bodennähe folgt aus dieser Gleichung mit der Solar-konstante $s = 1370 \text{Wm}^{-2}$ der Zahlenwert 255K oder -18°C . So kalt ist es aber im Durchschnitt auf der Erde gewiss nicht. Unsere elementare Rechnung hat nämlich für den Erdboden die tatsächliche Strahlungsbilanz nicht hinreichend beachtet. Wir haben (im Widerspruch zur Bild 2) so getan, als ob die vom All kommende Sonnenstrahlung gleich wieder ins All abgegeben würde. Die Rückstrahlung durch die Atmosphäre, also der Treibhauseffekt, kommt in der Gleichung (6) nicht vor.

Um das Modell möglichst einfach zu halten, berücksichtigen wir den Treibhauseffekt, indem wir den Zahlenwert in Gleichung (7) so korrigieren, dass sich die tatsächliche mittlere Erdtemperatur von ca. 288K (15°C) ergibt: Dann ist:

$$T^4 = 5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{K}^4 \text{m}^2}{\text{W}} \right] s \quad (8)$$

Der natürliche Treibhauseffekt sorgt dafür, dass es auf der Erde überhaupt erträglich ist. Problematisch ist also nicht der Treibhauseffekt an und für sich, sondern nur der über den natürlichen Treibhauseffekt hinausgehende anthropogen verursachte (zusätzliche) Treibhauseffekt.

Welche Temperaturänderung würde eine geringfügige Änderung der Solarkonstante bewirken? Entweder durch einfaches numerisches Berechnen oder durch Bilden des totalen Differentials über die erste Ableitung der Funktion (8) erhält man für kleine Änderungen den Zusammenhang:

$$\Delta T \cong 0,05 \cdot \Delta s \quad (9)$$

Nun verfügen wir über alle notwendigen Zahlen, um wichtige Angaben zu den Strahlungsantrieben in Bild 3 zu veranschaulichen. Die Bild 5 fasst die wesentlichen Abhängigkeiten zusammen.

$$\begin{array}{ll} \Delta s \times 0,175 \longrightarrow \Delta S & \Delta s \times 0,05 \longrightarrow \Delta T \\ \Delta S \times 5,7 \longrightarrow \Delta s & \Delta S \times 0,29 \longrightarrow \Delta T \end{array}$$

Bild 5: Wichtige Umrechnungsfaktoren zwischen Strahlungsantrieb, der Änderung der Solarkonstante und der Temperaturänderung

Prägt man sich diese Umrechnungsfaktoren ein wenig ein, dann kann man die Größenordnung von Strahlungsantrieben recht schnell beurteilen:

Angenommen, die Sonne würde ihre Strahlung so verändern, dass die Solarkonstante um 1 Wm^{-2} zunimmt. Dann würde dies einem Strahlungsantrieb ΔS von $0,175 \text{ Wm}^{-2}$ und einer Temperaturzunahme von $0,05 \text{ K}$ entsprechen. Der im IPCC-Bericht von 2007 ausgewiesene Gesamtstrahlungsantrieb von $\Delta S = 1,6 \text{ Wm}^{-2}$ würde einer Änderung der Solarkonstante von $9,1 \text{ Wm}^{-2}$ entsprechen. Er ist gleichbedeutend mit einer Temperaturzunahme von $0,5 \text{ K}$. Mit anderen Worten: Im IPCC-Bericht von 2007 wird ein totaler Strahlungsantrieb ausgewiesen, der ebenso groß ist, als hätte die Sonne ihre Strahlungsleistung um etwa 1% erhöht.

Die in verschiedenen Klimamodellen für das 21. Jahrhundert prognostizierte Temperaturerhöhung durch den anthropogenen Treibhauseffekt um 2 K würde rechnerisch ebenso wirken, wie eine Änderung der Solarkonstante um den gigantischen Wert von 40 Wm^{-2} bzw. so, als wäre die Sonne um annähernd 3% heller geworden. Weitere Beispiele lassen sich leicht finden und man kann sich das (hoffentlich ausbleibende) Eintreffen von worst case-Szenarien, die eine Temperaturzunahme von 4 K oder gar 6 K prognostizieren, eindringlich veranschaulichen.

4. Energieströme deponierter und regenerativer Energiequellen

Die Bilder 6 und 7 zeigen, wie die planetaren Energieströme geändert werden, wenn der Mensch Energiequellen nutzt, die in der Nähe der Erdoberfläche deponiert sind – also Öl, Kohl oder Kernkraft oder regenerative Energieträger. Im ersten Fall muss die zusätzlich freigesetzte Energie auch zusätzlich von der Erde abgestrahlt werden, damit das Strahlungsgleichgewicht unseres Heimatplaneten erhalten bleibt. Auf lange Sicht würde sich die Temperatur der Erde erhöhen.

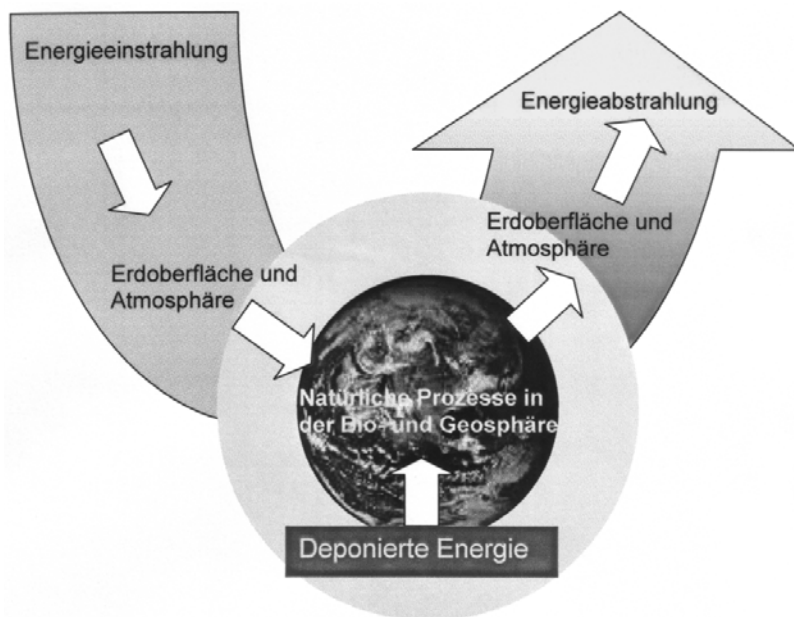


Bild 6: Globales Energieflussdiagramm für deponierte Energieträger

Im zweiten Fall geschieht folgendes: *Regenerative* Energien, etwa die Solar-energie, die Wind- und Wasserkraft oder die Energie aus Biomasse, werden letztlich aus dem Strom der Sonnenstrahlung gespeist. Regenerative Energieträger koppeln sich in den natürlichen Energiefluss ein. Sie zweigen einen gewissen Anteil daraus ab und leiten diesen Anteil nach seiner Nutzung dem globalen Energiestrom wieder zu. Deshalb wird das globale Strahlungsgleichgewicht durch die Nutzung regenerativer Energien nicht verändert. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass durch die Ausbeutung regenerativer Energien eine Umverteilung verursacht wird und sich Energieströme durch Bio- und Geosphären verändern. Wenn wir zu viel Sonnenstrahlung nutzen, bleibt für andere Lebewesen zu wenig übrig.

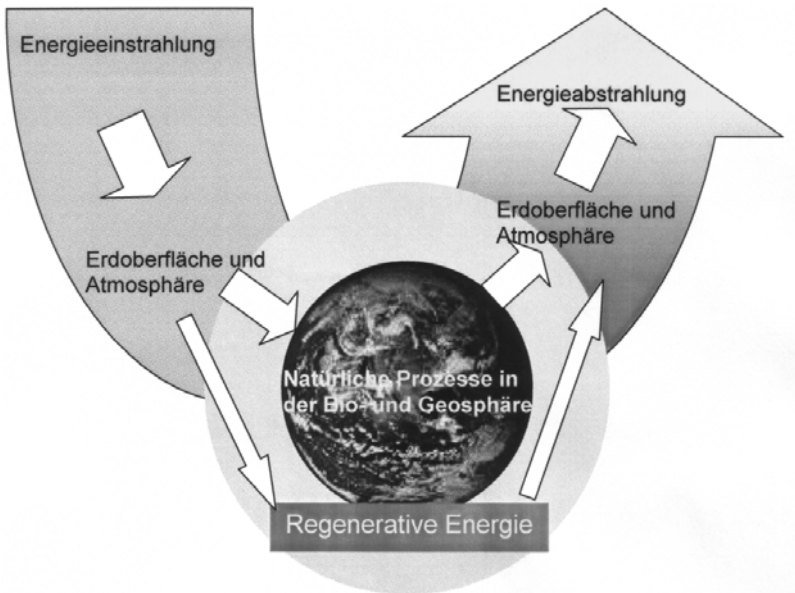


Bild 7: Globales Energieflussdiagramm für regenerative Energieformen

5. Wachstumsgrenzen für deponierte Energieträger

Um die Auswirkungen der Nutzung deponierter Energieträger auf den Strahlungshaushalt der Erde abzuschätzen, müssen wir das Strahlungsgleichgewicht der Erde betrachten und hierin den anthropogenen Anteil zusätzlich berücksichtigen [7].

M ist die neben der Sonnenleistung in das System fließende Leistung anthropogenen Ursprungs. Wir fügen den Betrag von M der Gleichung (6) auf der Eintragsseite hinzu und erhalten

$$(1 - A)\pi R^2 s + M = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (10)$$

Eintrag Austrag

Aus Gleichung (10) folgt für kleine Temperaturänderungen (Umstellen nach T und Bildung des totalen Differentials):

$$\Delta T = \frac{\Delta M}{4T^3} \cdot \frac{1}{4\pi R^2 \sigma}, \quad (11)$$

mit $\Delta T=2\text{K}$ erhält man für ΔM ein Wert von $3 \cdot 10^{15}\text{W}$. Führt man eine Wachstumsrechnung nach dem Muster der Gleichung (1) aus, so ergibt sich ein Zeithorizont von 146 Jahren. Dies ist die Zeitspanne, in der die Abwärme der Menschheit zu einer Klimaänderung führen könnte. Der Wert der Temperaturerhöhung von 2K ist dabei wie folgt begründet:

Durch eine Temperaturerhöhung verlagern sich die Klimazonen der Erde. Dies darf nicht zu schnell erfolgen. Während Menschen im günstigsten Fall ihre angestammten Siedlungsgebiete verlassen können und woanders Aufnahme finden, benötigen Tiere und Pflanzen für ihre Ausbreitung und Anpassung eine gewisse Zeit. Viele Forscher fordern deshalb beispielsweise, die Zunahme der mittleren Temperatur der Erdatmosphäre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 2°C zu begrenzen.

Um Missverständnissen vorzubeugen soll deutlich gesagt sein, dass gegenwärtig die Abwärme unserer Zivilisation im globalen Mittel absolut keinen Einfluss auf das Klima hat, dazu ist sie noch zu klein.

6. Wachstumsgrenzen für die Nutzung regenerativer Energien

Ein Hauptproblem der extensiven Nutzung regenerativer Energien haben wir bereits kurz erwähnt:

Jeder Teil der Bio- und Geosphäre wird unablässig von natürlichen Energieströmen durchsetzt, darüber hinaus werden in diesen Systemen vielfältige Stoffströme durch den Energieeintrag generiert. Indem wir regenerative Energien nutzen, schwächen oder verändern wir diese natürlichen Ströme. Die Frage ist also, wie viel dieser Energie man entnehmen kann, ohne die natürlichen Systeme zu beeinträchtigen.

Der Golfstrom zählt zu den am besten studierten Strömungsmustern der Erde, sodass für ihn Messwerte verfügbar sind. Jede Sekunde fließen über den Golfstrom der nördlichen Erdhemisphäre etwa 10^{15}J zu. Dieser energetische Löwenanteil des Golfstromes ist technisch praktisch nicht nutzbar. Lediglich die mechanische Strömungsenergie der Wassermassen selbst ließe sich über Wasserräder oder -propeller gewinnen. Die Strömungsleistung des Golfstromes wird auf weniger als $10^{13}\text{--}10^{14}\text{W}$ beziffert, beträgt also weniger als 10% der transportierten Wärme [8]. Angenommen, man könnte diese Leistung tatsächlich mit einem ziemlich hoch angesetzten technischen Wirkungsgrad von $\eta=0,5$ nutzen, dann könnte man vielleicht gerade so den heutigen Leistungsbedarf der Welt decken. Aber um welchen Preis! In diesen Fall würde der oberflächennahe Fluss des Golfstromes beträchtlich geschwächt werden. Die entzogene Strömungsenergie würde zu einer deutlichen Verringerung des

Wärmetransportes führen, Nordeuropa würde sich deutlich abkühlen, globale Auswirkungen auf das Klima wären die Folge. So deutlich wie in unserem Beispiel treten die Auswirkungen regenerativer Energienutzung gegenwärtig nicht zu Tage.

Eine Schätzung des globalen Potenzials regenerativer Energien (ohne Solarenergie) ist über den Wirkungsgrad einer Carnot-Maschine möglich. Bei der Umwandlung der Sonnenenergie in mechanische Energieformen wie die Strömungsenergie von Wind und Wasser geht die Erde zunächst einen gewaltigen Schritt auf der thermischen „Energieentwertungsleiter“ voran, denn sie nimmt die Sonnenstrahlung (mit einer Temperatur von etwa $T=6000\text{K}$) durch Strahlungsabsorption auf, wobei sich ihre untere Atmosphäre und der Boden im Mittel auf 288K erwärmen. Für eine Umwandlung der oberflächennahen thermischen Energie der Temperatur 288K in mechanische Energieformen stehen dann nur noch vergleichsweise geringe Temperaturunterschiede in der Größenordnung von $\Delta T \approx 10\text{--}20\text{K}$ zur Verfügung (typische Temperaturunterschiede zwischen hohen und niedrigen geographischen Breiten, an der Grenze von Land- und Wassermassen oder bei Nutzung des Aufwindes in der Atmosphäre). Mithin kann von der in Bodennähe vorhandenen thermischen Energie allerhöchstens noch der Anteil

$$\eta \approx \frac{20\text{K}}{T_B} = \frac{20\text{K}}{288\text{K}} = 0,07 \quad (12)$$

zur Umwandlung in mechanische Energieformen abgezweigt werden. Im globalen Mittel gelangen je Quadratmeter Erdoberfläche etwa 240W Sonnenstrahlung zum Erdboden (mit den in Gleichung (5) gemachten Annahmen), insgesamt können davon also höchstens $17\text{W}/\text{m}^2$ mechanischen Energieformen – also zum Beispiel Wind- und Wasserströmungen – zufließen. Die tatsächlichen Wirkungsgrade sind meist deutlich geringer. Auf die Oberfläche der Erde umgerechnet ergibt sich mit dem in Gleichung (12) berechneten Wirkungsgrad eine Leistung von $9 \cdot 10^{15}\text{W}$. Allerdings würde bei einer Nutzung dieser Leistung jedes Ökosystem der Erde zugrunde gehen, da der Stofftransport durch Wasser und Wind ausbleiben würde.

Auch regenerative Energien eröffnen unserer Zivilisation keinen unbeschränkten Wachstumshorizont. Wir werden diese Energieformen dringend benötigen, um das akute Problem des anthropogenen Treibhauseffektes in den nächsten Jahrzehnten zu lösen. Wenn der Umbau der Energiewirtschaft gelingt, dann werden wir – bei unbeschränktem Wachstum – jedoch bald bemerken, dass auch diese Energien „übernutzt“ werden können. An einer ho-

cheffizienten Energieentwertung und dem Verlassen des Wachstumspfadens führt kein Weg vorbei.

Begrenzender Faktor	Leistungslimit	Erreicht in Jahren bei einem Wachstum von	
		4%	2%
Erreichung der Strömungsleistung des Golfstromes	10^{13} – 10^{14} W	Näherungsweise erreicht	
Nutzung aller regenerativer Ressourcen der Erde (ohne direkte Sonnennutzung)	$9 \cdot 10^{15}$ W	167	329

Tabelle 2: Absolute Leistungsgrenzen und Zeithorizonte für den Einsatz regenerativer Energien (ohne Solarenergie)

Literatur:

- [1] Meadows, D. H. et al.: The Limits to Growth, Universe Books, New York, 1972
- [2] Meadows, D. et al.: Die neuen Grenzen des Wachstums, 4. Auflage, DVA, Stuttgart, 1992
- [3] International Energy Agency: World Energy Outlook 2002, Paris, 2002
- [4] BP Weltenergiestatistik, Juni 2005,
http://www.deutschebp.de/liveassets/bp_internet/germany/STAGING/home_assets/assets/deutsche_bp/broschueren/de_coal_section_2005.pdf
- [5] Alley, R. B. et al.: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen (Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger), Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des IPCC,
 verfügbar (9/2007) unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ipcc_entscheidungstraeger_agi.pdf
- [6] Andrews, D. G.: An Introduction to Atmospheric Physics, Cambridge University Press, 2000, S. 6–8
- [7] Holdren, J. P.: Global thermal pollution, in: Holdren, J. P. (Ed.): Global ecology, New York, Harcourt Brace Jovanovich, 1971
- [8] Heinloth, K.: Die Energiefrage, 2. Aufl., Vieweg, Braunschweig, 2003, S. 305