

Galaktischer Energieverbrauch

Tom Murphy ^[1]
übersetzt von Tom Schülke

1 Ein Artikel von Prof. Tom Murphy, übersetzt von Tom Schülke. Im Original heißt er „Galactic-Scale Energy“ und gehört zu den meistgelesenen des Blogs. <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/2011/07/galactic-scale-energy/> – auf deutsch erschienen unter: <http://www.peak-oil.com/2012/04/galaktischer-energieverbrauch/>

Seit dem Beginn der industriellen Revolution haben wir ein beeindruckendes, sehr stabiles Wachstum des Energieverbrauchs der menschlichen Zivilisation erlebt. Die Daten der US-amerikanischen „Energy Information Agency“ zeigen für den US-Energieverbrauch seit 1650 (1635-1945, 1949-2009, inklusive Holz, Biomasse, fossiler Treibstoffe, Wasserkraft, Nuklearenergie u.s.w.), einen auffallend konstanten Wachstumskurs, der durch eine jährliche Wachstumsrate von 2,9% gekennzeichnet ist. (s. Abb. 1)

Es ist wichtig die zukünftige Entwicklung unseres Energieverbrauchs zu verstehen, weil Regierungen und Organisationen überall Annahmen machen, die auf der Erwartung aufbauen, dass der historische Wachstumstrend der vergangenen Jahrhunderte weiter anhalten wird. Ein Blick auf die Abbildung 1 zeigt, dass dieses eine absolut verständliche Annahme ist.

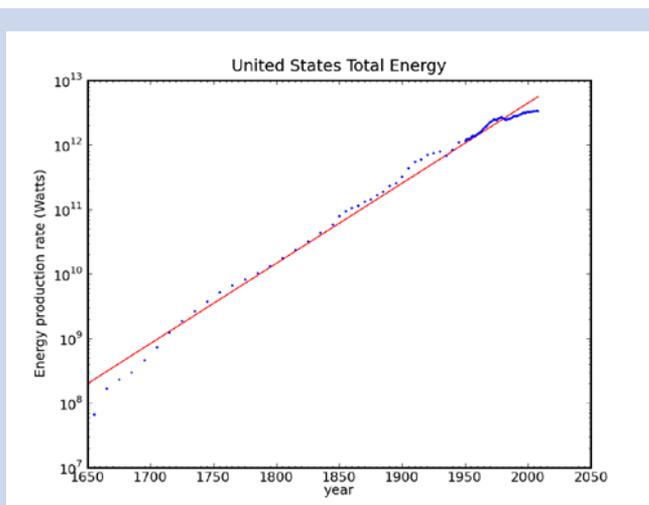


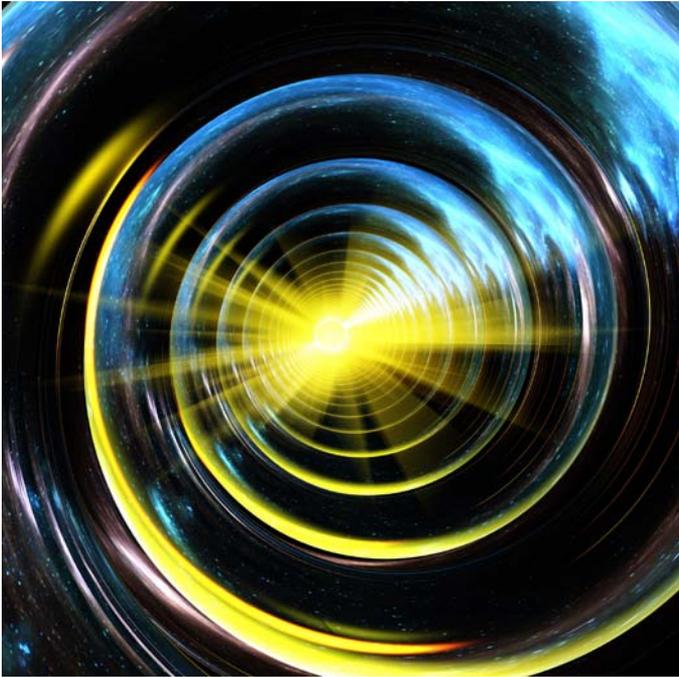
Abb. 1: Gesamt-US-Energieverbrauch seit 1650. Die senkrechte Achse ist logarithmisch skaliert, so dass eine exponentielle Wachstumskurve, verursacht durch eine stetige Wachstumsrate, als gerade Linie dargestellt wird. Die rote Linie entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von exakt 2,9%.
Datenquelle: EIA.

Wachstum ist so sehr zu einer Hauptstütze unserer Gesellschaft geworden dass wir anhaltendes Wachstum als normale Gegebenheit empfinden. Wachstum bringt viele positive Vorteile mit sich. Autos, Fernsehen, Luftverkehr und Dinge wie „iGadgets“. Die Lebensqualität erhöht sich, die Gesundheitsvorsorge wird besser und das Leben wird im Laufe der Zeit komfortabler. Wachstum trägt in sich eine Erwartung an die Zukunft: Das Versprechen, dass Investitionen in die Zukunft positive Kapitalerträge bringen werden. Wachstum ist damit die Basis für Zinsen, Kredite und für die Finanzindustrie.

Weil Wachstum uns seit „zahllosen“ Generationen begleitet hat und weil jeder den wir, oder selbst unsere Großeltern je getroffen haben, es miterlebt hat, ist Wachstum zum zentraler Mythos unseres Daseins und Handelns geworden. Es fällt uns deshalb schwer, uns eine andere Entwicklung als ein kontinuierliches Wachstum vorzustellen.

Dieser Text beinhaltet ein schlagendes Argument gegen die Möglichkeit dauerhaften Wachstums mit den aktuellen Wachstumsraten – das gilt sogar innerhalb eines relativ überschaubaren Zeitrahmens. Zum Zweck leichter Verständlichkeit gehen wir bei unseren Überlegungen nicht von der historischen Wachstumsrate von 2,9% aus, sondern von einer geringeren Wachstumsrate von nur 2,3%. Solch eine jährliche Wachstumsrate führt dazu, dass wir eine Verzehnfachung unseres Verbrauchs alle 100 Jahre erwarten können. Wir starten die Stoppuhr heute bei einem globalen Energieverbrauch von 12 Terrawattstunden (was bedeutet, dass der durchschnittliche Weltbewohner einen Anteil von zwei Kilowattstunden am Gesamtverbrauch hat). Wir beginnen mit einfachen praktischen Annahmen und lassen dann

unserer Phantasie über realistische technische Entwicklungen freien Lauf. Selbst unter der Annahme futuristischer Science-Fiction-Technologien werden wir erkennen, dass wir wesentlich früher auf Grenzen stoßen werden, als die meisten Menschen annehmen. Zugegebenermaßen sind die Annahmen die unseren Überlegungen zugrunde liegen stark vereinfacht dargestellt. Dennoch: Es zeigt sich am Ende, dass genau diese Vereinfachung der entscheidende Punkt ist.



© Martin Bangemann

Ein Wettrennen zur Galaxis

Ich war schon immer von der Tatsache beeindruckt, dass die Erde in nur einer Stunde so viel Solarenergie empfängt, wie die Menschen in einem ganzen Jahr verbrauchen. Was für eine Hoffnung in diesem Statement liegt! Aber lassen Sie uns nicht abschweifen – noch nicht.

Nur 70% der Sonnenenergie die die Erde erreicht, trägt zum irdischen Energiebudget bei. Der Rest von 30% wird augenblicklich von den Wolken und der Atmosphäre sowie dem Land zurückgestrahlt, ohne das es absorbiert wird. Als Landbewohner sollten wir in Betracht ziehen, das wir Solarpaneele nur an Land unterbringen können, so dass wir lediglich 28% der Erdoberfläche für Solarenergie nutzen können. Wir nehmen weiterhin an, dass Photovoltaik und Solarthermie lediglich mit einer Effizienz von 15% arbeiten. Lassen Sie uns mit einem Wert von 20% kalkulieren. Der Nettoeffekt dieser Annahmen führt zu einer verfügbaren Nettoenergiemenge von 7.000 TWh, ungefähr 600 mal mehr Energie als der derzeitige weltweite Energieverbrauch. Viel Spielraum nach oben also. Oder?

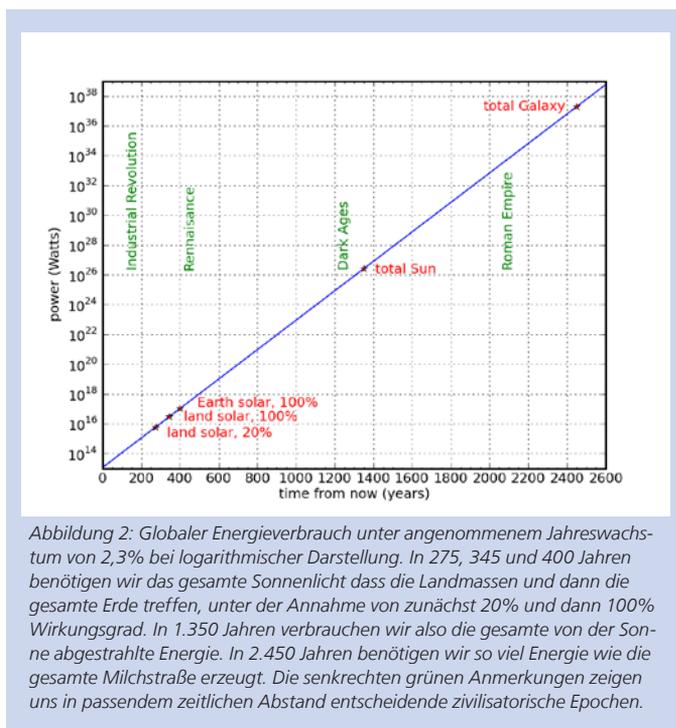
Wann würden wir bei einer Wachstumsrate von 2,3% an Grenzen stoßen? Erinnern wir uns daran, dass wir bei 2,3% Wachstum alle 100 Jahre eine Verzehnfachung des Verbrauchs erleben werden, also operieren wir in 200 Jahren beim 100-fachen des heutigen Levels. Wir erreichen somit einen Verbrauch von 7.000 TWh in 275 Jahren. 275 Jahre scheinen lang in Maßstäben eines einzelnen Menschen, aber nicht besonders lang im Rahmen menschlicher Zivilisationen. Und stellen wir uns nur einmal diese Welt vor, die wir dann haben würden. Jeder Quadratmeter der Oberfläche wäre mit Photovoltaik-Anlagen überzogen. Wo würden wir unsere Nahrungsmittel anbauen?

Nun wollen wir die einschränkenden Grenzen etwas lockern. Sicherlich werden wir in 275 Jahren den Wirkungsgrad der Solarzellen verbessert haben. Schließlich ist es ja unser Plan, Solarenergie zu unserer wichtigsten Energiequelle der Zukunft zu machen. Lassen Sie uns ins Angesicht thermodynamischer Grenzen lachen und annehmen, wir könnten 100% Wirkungsgrad erreichen. (Ja! Wir haben den Science-Fiction-Teil unserer Überlegungen erreicht.) Dieses bringt eine Verbesserung um den Faktor fünf, womit wir uns weitere 70 Jahre zusätzlichen Wachstums erkaufen. Aber wer benötigt schon Ozeane? Lasst uns außerdem die Ozeane mit Solarzellen zupflastern. Das bringt nochmal 55 Jahre. In 400 Jahren treffen wir unter diesen Annahmen dennoch auf die Grenzen der solaren Ertragskapazität der gesamten Oberfläche unseres Planeten. Dieses ist bedeutsam, weil Biomasse, Wind und hydroelektrische Energieerzeugung von der Sonnenstrahlung abhängig sind und fossile Energieträger die irdische Batterie darstellen, die chemisch die Sonnenenergie von Jahrmillionen speichert. Lediglich Kernkraft, geothermale Energie und Gezeiten stammen nicht vom Sonnenlicht. Ein Beitrag der für diese Überlegungen nicht relevant ist, da er nur wenige Prozent der Gesamtenergiebilanz ausmacht.

Der entscheidende begrenzende Faktor unserer Überlegung ist somit die Größe der Erdoberfläche. Würden wir Solarzellen mit der Größe der sonnenbestrahlten Erdoberfläche außerhalb der Erdatmosphäre positionieren, könnten wir die 30% zurückreflektierter Sonnenenergie auch noch ernten – doch die weiteren 16 Jahre Wachstum würden uns kaum weiterbringen. Aber weshalb uns selbst auf die Erde beschränken – wo wir doch quasi schon mit einem Fuß im All stehen? Wir wollen in großen Bahnen denken: Lasst uns die gesamte Sonne mit einer gigantischen Kugel aus Solarzellen umgeben! Und nehmen wir wieder an, dass der Wirkungsgrad dieser Solarzellen 100% wäre.

Kümmern wir uns auch nicht darum, dass eine nur 4 mm starke Struktur, die die Sonne in der Distanz der Erde umgeben würde, die gesamte Masse der Erde an Materialien – und spezielle Materialien wie Seltene Erden – erfordern würde, so würden wir mit diesem Schritt die heutige Wachstumsrate von 2,3% weitere 1.350 Jahre lang ermöglichen.

An diesem Punkt könnte Ihnen klar geworden sein, dass unsere Sonne ja nicht der einzige Stern in unserer Galaxie ist. Die Milchstraße beinhaltet ca. 100 Milliarden Sonnen. Die meiste Energie wird einfach in den Weltraum abgestrahlt. Erinnern wir uns an den Faktor 10 den unser Verbrauch alle einhundert Jahre anwächst. 100 Milliarden ist elf mal der Faktor 10, so dass die gesamte Milchstraße uns weitere 1.100 Jahre Wachstum erlauben würde. In nur 2.500 Jahren würden wir bei anhaltendem Wachstum von 2,3% die gesamte Sonnenenergie unserer Galaxie verbrauchen. Wir wissen in etwa, was Menschen vor 2.500 Jahren gemacht haben. Ich denke ich kann mit Bestimmtheit sagen, was wir in 2.500 Jahren **NICHT** machen werden.



Warum nur Solar-Energie?

Einige Leser könnten sich daran stören, dass wir uns in unseren Überlegungen auf solare bzw. stellare Energie beschränken. Wenn wir in großen Zügen denken, könnten wir uns von der kümmerlichen Solarenergie abwenden und uns der futuristischsten Energiequelle zuwenden, die uns vorstellbar scheint: Die Kernfusion!

Der Überfluss von Deuterium in gewöhnlichem Wasser würde uns erlauben, eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle zu nutzen. Direkt hier auf der Erde. Wir werden an dieser Stelle keine detaillierte Analyse dieser Technik anstreben, weil das für unsere Überlegungen hier nicht notwendig ist. Das unbarmherzige Anwachsen unseres Verbrauchs, so wie er oben skizziert wurde, bedeutet, dass in 1.400 Jahren jede denkbare Energiequelle die Leistungsfähigkeit der Sonne erreichen und dann überbieten müsste. Unabhängig von der verwendeten Technik.

Lassen Sie mich den entscheidenden Punkt wiederholen:

Ganz egal welche Technik wir benutzen: Bei einem Wachstum von 2,3% müssten wir in 1.400 Jahren so viel Energie produzieren wie die gesamte Sonne .

Ein Wort der Warnung: Dieses Kraftwerk könnte ein wenig überhitzen! Die Gesetze der Thermodynamik erzwingen nämlich, dass wenn wir eine der Sonne vergleichbare Energie auf unserer Erde – welche erheblich kleiner ist als die Sonne – erzeugen würden, die Temperatur auf der Erdoberfläche höher wäre, als die auf der Oberfläche der Sonne!

Thermodynamische Grenzen

Wir können uns exaktere Gedanken über die thermodynamischen Grenzen dieses Problems machen. Die Erde absorbiert reichlich Energie von der Sonne, weit mehr als unser gesamter aktueller weltweiter technischer Verbrauch. Die Erde verliert diese Energie wieder, indem sie die Energie in den Weltraum abstrahlt: Das meiste auf einer infraroten Wellenlänge des Lichts. Es gibt keinen anderen Weg für die Erde, Hitze los zu werden. Die Absorption und die Abstrahlung von Energie befindet sich für die Erde als Ganzes in einem beinahe perfekten Gleichgewicht. In der Tat: Wenn es nicht so wäre, würde die Erde sich langsam erwärmen oder abkühlen. Gewiss haben wir die Fähigkeit der Erde geschwächt, infrarotes Licht abzustrahlen, was zu einer globalen Erwärmung führt. Dennoch sind wir immer noch im Gleichgewicht mit einer Abweichung von weniger als einem Prozent.

Da die Strahlungsenergie mit der vierten Potenz der Temperatur ansteigt (wenn es in absoluten Temperaturgeraden, also in Kelvin ausgedrückt wird), können wir eine Gleichgewichtstemperatur für die Erdoberfläche berechnen – abhängig von einer bestimmten zusätzlich durch unsere gesellschaftlichen Aktivitäten erzeugten Energiemenge.

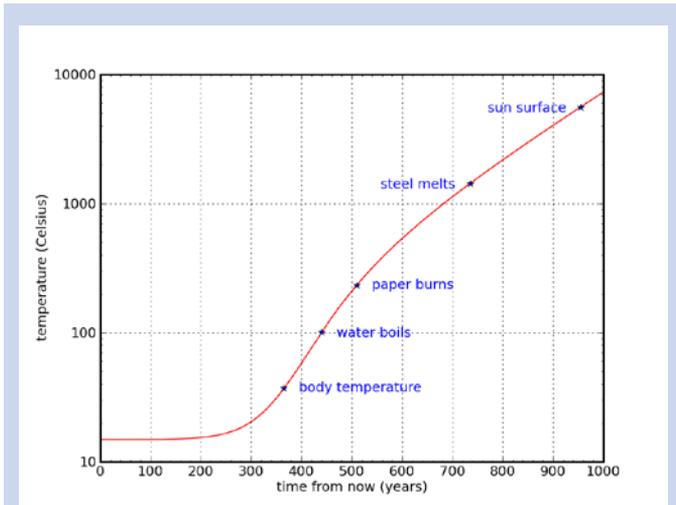
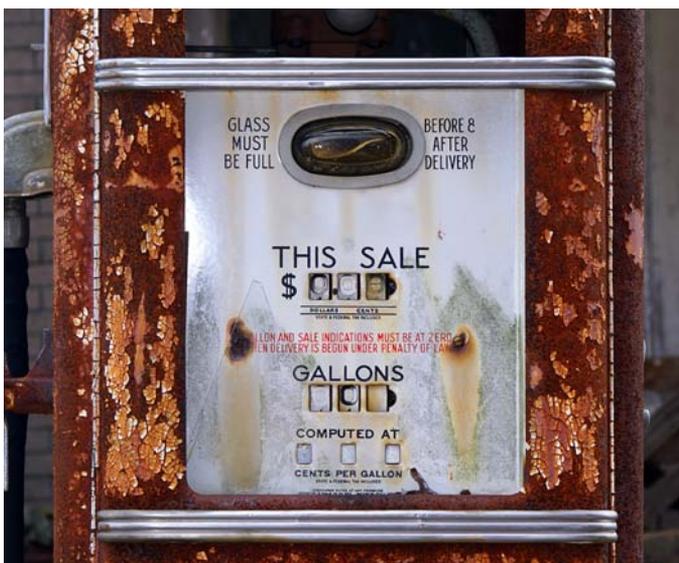


Abbildung 3: Die Erdoberflächentemperatur bei einem gegebenen exponentiellem Wachstum des Energieverbrauchs von 2,3% p.a., unter der Annahme einer anderen Energiequelle als Sonnenlicht, und unter der Annahme, dass wir diese Energie auf der Erdoberfläche erzeugen. Selbst futuristische Traum-Energiequellen wie Kernfusion bewirken in wenigen hundert Jahren unannehmbare Bedingungen, wenn das Wachstum weitergeht. Die senkrechte Skalierung ist logarithmisch.

Das Resultat der Überlegungen ist in Abbildung 3 dargestellt. Aus den vorhergehenden Überlegungen wissen wir, dass wenn wir uns auf die Erdoberfläche beschränken, wir das solare Potential in 400 Jahren vollständig ausschöpfen werden. Um Wachstum über diese Zeit hinaus fortzusetzen, würden wir solare Energieernte durch Kernfusion oder Kernspaltung ersetzen müssen. Doch die Analyse der thermodynamischen Gesetze sagt uns: **Wir werden sowieso geröstet.**

Beendet den Wahnsinn

Der Zweck dieser Übung ist es, die Absurdität der Annahme herauszuarbeiten, dass wir für immer unseren Energieverbrauch weiter wachsen lassen können, selbst dann, wenn wir es moderater angingen als in den letzten 350 Jahren. Die Analyse ist ein leichtes Ziel für



© Martin Bangemann

Kritik, wenn man auf die vereinfachten Annahmen zielt. Ich würde es daher gerne gleich selbst zerpfücken: Vor allem würde weiteres exponentielles Wachstum unnötig, wenn sich die Bevölkerungszahl stabilisieren würde. Speziell der Anstieg des Energieverbrauchs würde sich entspannen, wenn die Sättigung der Welt mit Menschen erreicht würde. Aber lassen Sie uns nicht den springenden Punkt dieses Beitrages übersehen:

Ein dauerhafter Anstieg des Energieverbrauchs ist bereits in überschaubaren Zeiträumen eine physikalische Unmöglichkeit.

Die vorangegangene Analyse liefert einen sehr eingängigen Weg, diesen Punkt zu untermauern. Ich habe die Erfahrung gemacht, dass viele Menschen auf diese Weise die natürlichen Grenzen unbegrenzten Wachstums verstehen und akzeptieren können.

Wenn wir erst einmal hinnehmen können, dass physikalisches Wachstum eines Tages aufhören, oder sich gar umkehren muss, dann können wir auch verstehen, dass ein ökonomisches Wachstum auf gleiche Weise zum Ende kommen muss.

Originalbeitrag



Beitrag auf deutsch



Danksagung: Tom Murphy bedankt sich bei Kim Griest für seine Kommentare und dafür, die Idee einzubringen, dass wir in 2.500 Jahren die Energie der gesamten Milchstraße verzehren würden, sowie Brian Pierini für seine hilfreichen Kommentare. Ein Dank auch an Tom Schülke für seine Übersetzung.

Kürzlich stellte Tom Murphy ein Gedankenprotokoll eines Zusammentreffens zwischen ihm (als Physiker) und einem Ökonomen auf einer Dinnerparty ins Netz. Wer mag, kann die obige Argumentation dort in Form eines Gesprächs wiederfinden: „Exponential Economist Meets Finite Physicist“ unter <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/2012/04/economist-meets-physicist/>

