

Das ETP-Modell (Energy Total Production)

Autor: Berndt , 15.November 2015

1 Einführung

Jeder der sich mit dem Thema Grenzen der Ölförderung beschäftigt, wird den Begriff EROI (oder EROEI) kennen. EROI steht für Energy Return on Energy invested, und bezeichnet den energetischen Erntefaktor. Bei der Ölförderung war der EROI-Wert Anfang des 20.ten Jahrhunderts etwa 100, und ist seitdem kontinuierlich gefallen, und wird heute etwa auf 10 geschätzt. Das Problem bei der EROI – Bestimmung ist, welche Faktoren einzuberechnen sind. Um eine genaue Bestimmung der zu Ölförderung nötigen Energie durchzuführen, sind unter anderem zu berücksichtigen: Energie zum Bohren der Quellen, für die Fertigung der Stahlrohre, Pumpen, Fahrzeuge, Gebäude, Straßen. Energie zum Pumpen von Öl und Wasser, Energie zum Raffinieren des Öls, zum Transport usw. Die genaue Bestimmung des EROI durch Addition der Einzelenergien ist nahezu unmöglich.

Vor ca. einem dreiviertel Jahr stieß ich im Internet auf das EPT-Modell der Hillsgroup. (<http://www.thehillsgroup.org/index.html>) Die Berechnung der totalen Produktions Energie ETP erfolgt mit einem grundsätzlich anderem Ansatz: Die Gesetze der Thermodynamik werden auf die Ölförderung angewendet. Die Thermodynamik ist die Wissenschaft, die sich mit der Umwandlung von einer Energieform in eine andere beschäftigt. Da Ölförderung in erster Linie mit Energie zu tun hat, ist es selbstverständlich, das man sie thermodynamisch betrachtet; eigentlich ist es unverständlich, dass es vor der Hillsgroup (kurz: HG) niemand tat.

Ich habe mir die Studie der HG beschafft und begonnen die Theorie zu überprüfen. An einzelnen Stellen gebe ich die dort beschriebene Herleitung aufgrund eigener Überlegungen etwas anders wieder.

2 Thermodynamik

Thermodynamik ist eines der schwer verständlichen Fachgebiete der Physik. Das liegt unter anderem an den speziellen Begriffen wie Entropie, Enthalpie usw., sowie an den häufigen Gebrauch von Differentialen und Ableitungen. Die Ergebnisse sind manchmal kontraintuitiv, trotzdem sind sie wie in anderen Bereichen der Physik gültig und zu akzeptieren.

Ganz wichtig ist die dem folgendem zugrunde liegende Denkweise: Die Abläufe bei der Ölproduktion werden durch Energie bestimmt. Nicht „Money makes the world go around“, Energie hält alles am laufen. Energie wird eingesetzt, um das Rohöl aus der Erde zu holen, zu transportieren, zu verarbeiten.

Die Energie pro Barrel Öl mit API 37.5 ist immer konstant und wird immer konstant bleiben. Der

wirtschaftliche Gegenwert eines Barrels Öl erlaubt für verschiedene Zeitpunkte, Förderkosten von Öl miteinander zu vergleichen.

Wer die Herleitung der Diagramme überspringen will, sollte in Kapitel 3.7 weiterlesen.

2.1 Begriffe

Bevor die Theorie der HG näher beschrieben wird, sind einige Begriffe zu definieren. Bei der Angabe von Größen verwende ich vorzugsweise das SI-System (Meter, kg, Liter, Sekunde, Kelvin). Die Hillsgroup verwendet immer das in der Erdölindustrie übliche imperiale System (Fuß, Pfund, Gallone, Sekunde, Rankine). Das imperiale System ist in Deutschland ungewohnt, seine Verwendung macht die ETP-Theorie schwerer verständlich.

Mit **Energie** des Öls bezeichnet man immer den thermischen Energieinhalt, d.h. die Wärmemenge, die bei der Verbrennung des Öls entsteht.

Die **Exergie** des Öls ist die technisch nutzbare Energie. Bei jeder Nutzung von Energie geht ein Teil davon als **Abwärme** verloren. Der Energieinhalt des Öls ist die Summe aus Exergie und Abwärme. Es gibt einen theoretisch nutzbaren Maximalwert der Exergie und einen praktischerweise erreichbaren Wert.

Rohöl wird in unterschiedlichen Qualitäten und Dichten gefördert. Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf Öl mit einem **API** von 37,5. Rohöl mit API 37,5 hat eine Dichte von 0,8356 kg/liter und einen **Energieinhalt e_{THERM} von 12,97 kWh/kg (=46,7 MJ/kg)**. Der theoretisch nutzbare **Maximalwert der Exergie von Rohöl ist 71 %** (9,21 kWh/kg) seiner thermisch nutzbaren Energie; praktisch nutzbar sind 62% . (8,04 kWh/kg)

Die Unterscheidung zwischen der thermischen und der mechanisch nutzbaren Energie ist extrem wichtig. Wenn beispielsweise 100 kWh Energie benutzt werden, um Erdöl mit 100 kWh Energieinhalt zu fördern, hat man zwar einen EROI von 1, aber verliert mindestens 29 kWh, hat also 29% Energieverlust.

Die **Wärmekapazität** wird mit c bezeichnet. Die Wärmekapazität c_c von Rohöl ist 1884 J/K/kg (Wasser : $c_w = 4200$ J/K/kg)

Spezielle thermodynamische Begriffe in einem kurzen Artikel verständlich erklären ist unmöglich. Wer mehr darüber wissen will, sollte sich Literatur dazu besorgen. Hier kann nur eine kurze Erklärung der notwendigen Begriffe stehen.

Ein wichtiger Begriff der Thermodynamik ist die **Entropie** S (Einheit J/K). Man kann sie sich ähnlich wie die elektrische Ladung vorstellen, die zwischen Körpern ausgetauscht werden kann. Entropie fließt immer vom heißeren zum kälteren Körper, genau wie die **Wärme** Q . Durch Multiplikation mit der Temperatur T erhält man aus der Entropie dS die dazugehörige Wärme $dQ=dS \cdot T$. Wärme ist eine Energieart.

Die **spezifische Entropie** s ist die Entropie pro kg (Einheit: J/K/kg). Bei einer inkompressiblen Flüssigkeit ist sie gleich der spezifischen Wärmekapazität c .

Die spezifische totale Produktionsenergie, also totale Energie zur Förderung von einem kg Rohöl,

wird mit e_{TP} bezeichnet.

2.2 Hauptsätze der Thermodynamik

Der **erste Hauptsatz der Thermodynamik** sagt, dass in einem geschlossenen System bei reversiblen Änderungen die Entropie konstant ist. (Energieerhaltung der Thermodynamik). Reversibel heisst z.B. reibungsfrei. Die Summe aller Entropien ist im geschlossenen idealen System immer die gleiche.

Der **zweite Hauptsatz** sagt, dass in einem realen System Prozesse immer irreversibel sind und in einem geschlossenen realen System die Entropie zunimmt.

$$\frac{dS}{dt} = +\dot{\sigma} \quad (\text{Gl.1})$$

$\dot{\sigma}$ ist dabei die zeitliche Zunahme der Entropie (Irreversibilität) und immer positiv.

$$\dot{\sigma} > 0$$

Der Punkt über einem Ausdruck bedeutet die zeitliche Änderung des Ausdrucks und gleichbedeutend mit der Ableitung nach der Zeit

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (\text{Gl.2})$$

Die allgemeine Formel für die **Entropieänderung eines offenen Systems** ist:

$$\frac{dS_{CV}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} + \sum_i m_{i,e}^* s_{i,e} - \sum_j m_{j,a}^* s_{j,a} + \dot{\sigma}_{CV} \quad (\text{Gl. 3})$$

$m_{i,e}$ sind die in das Kontrollvolumen eintretenden Massenströme

$m_{i,a}$ sind die aus dem Kontrollvolumen austretenden Massenströme

$s_{i,e}$, $s_{i,a}$ sind die dazugehörigen spezifischen Entropien in J/K/kg

Index CV: Kontrollvolumen (control volume)

T : Temperatur in K

Die Formel bedeutet in Worten: Die Entropieänderung im Kontrollvolumen setzt sich zusammen aus dem Wärmefluss durch die Systemwand, plus der Wärme aus der hereinkommenden und herausfließenden Materie, sowie der Entropiezunahme durch irreversible Prozesse.

2.3 Systemdefinition

Um die Thermodynamik anzuwenden, sind offene und geschlossene Systeme zu definieren. Die HG verwendet folgende Systeme:

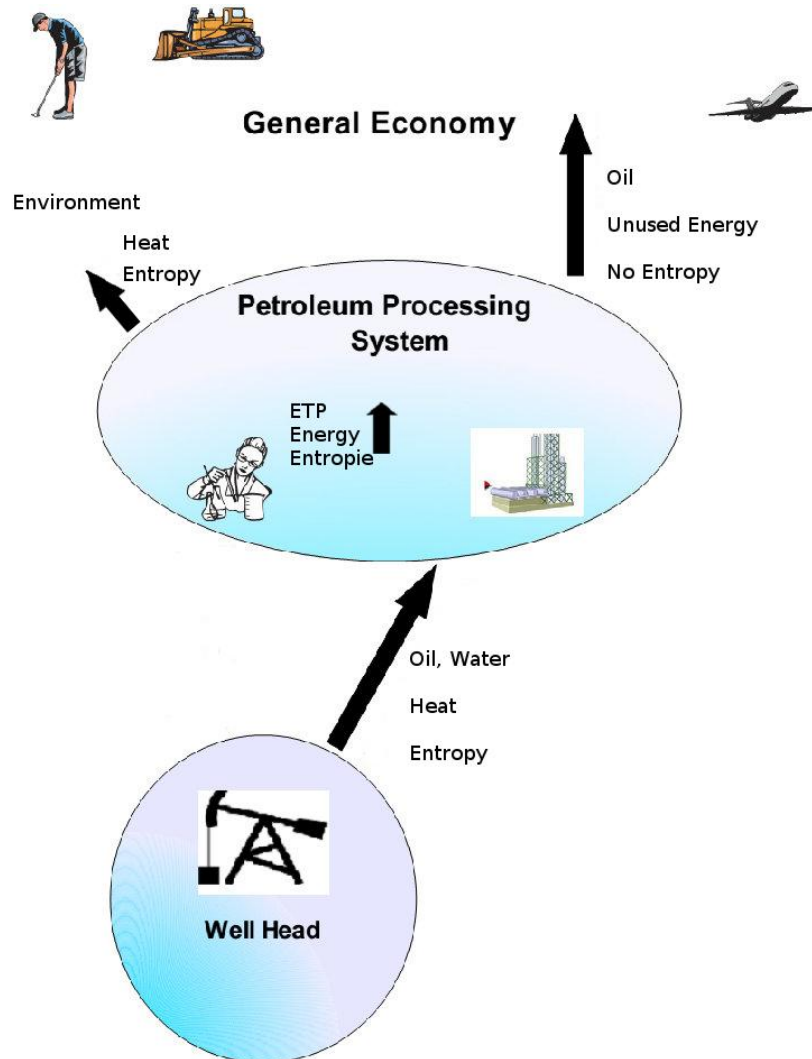


Abbildung 1: Systemdefinition (nach HG:http://www.thehillsgroup.org/depletion2_019.htm)

1. Der **Well Head** (Bohrloch) steht für das Ölreservoir und die Bohrlochwand. Durch die Wand des Bohrlochs fließen Öl und Wasser zum PPS. Öl und Wasser transportieren Wärme und Entropie. Ihre Temperatur ist der Tiefe des Bohrlochs entsprechend.

2. Das **PPS** (Petroleum Processing System) enthält alles, was das Öl fördert, transportiert und verarbeitet. In das PPS fließen Öl und Wasser und deren Wärme und Entropie. Das PPS liefert die ETP (gesamte Produktionsenergie) zur Ölförderung. Dabei entstehen Irreversibilitäten (Entropie). Das PPS ist auf Umgebungstemperatur. Die nicht verwendete Energie verlässt das PPS als verarbeitetes Öl in die General Economy. Die Wärme und Entropie von Öl und Wasser werden an die Umgebung abgegeben. Die Temperatur des Öls in PPS und General Economy ist gleich, daher fließt keine Entropie mit dem verarbeiteten Öl in die General Economy.

3. Die **General Economy** nutzt die Energie des verarbeiteten Öls. Von ihr fließt keine Energie und keine Entropie in die beiden ersten Systeme.

Well Head und PPS bilden ein geschlossenes System. Die Entropie in diesem geschlossenen System muss nach dem zweiten Hauptsatz konstant bleiben oder steigen. Das geht nur, wenn ETP mindestens so groß ist wie es der hereinfließenden Entropie entspricht. Also kann man Gleichung 3 verwenden, um den Minimalwert für ETP zu ermitteln.

Die oben definierten Systeme sind einfach; man könnte darüber streiten, ob man nicht ein viel komplizierteres System verwenden muss. Andererseits kann man dieses einfache System gut bewerten und anschauliche Schlussfolgerungen ziehen. Ein kompliziertes System wird nie anschaulich sein.

3 Bestimmung von ETP

3.1 Entropiefluß im Wellhead

Aus dem Wellhead fließt ein kontinuierlicher Strom von Öl und Wasser. Es fließt keine Materie in den Wellhead. Durch den Mantel tritt keine Wärme aus.

Gleichung 3 für den Wellhead besteht aus 4 Termen. Der erste Term enthält den Wärmefluss. Es gibt keinen Wärmefluss durch die Well-Wand, daher ist er Null.

$$\frac{\dot{Q}}{T} = 0 \quad (\text{Gl. 4})$$

Term 3: Es gibt keinen Massestrom ins Well (Bohrloch). Daher ist dieser Term auch Null.

$$\sum_j \dot{m}_{j,\epsilon} s_{j,\epsilon} = 0 \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Irreversibilitäten im Wellhead setzen wir zu Null, denn alle Irreversibilitäten im System werden in das PPS eingerechnet.

$$\sigma_{WH} = 0 \quad (\text{Gl. 6})$$

Es verbleibt nur noch Term 1:

Der Massestrom aus dem Well ist die Summe der Ströme aus Rohöl und Wasser. Der Wasseranteil wird englischsprachig „water cut“ genannt:

$$\sum_i \dot{m}_{i,\epsilon} s_{i,\epsilon} = \dot{m}_C s_C + \dot{m}_W s_W = \dot{m}_C c_C + \dot{m}_W c_W \quad (\text{Gl. 7})$$

Index C: Crude Oil

Index W: Wasser

c: Wärmekapazität

T_R: tiefenabhängige und zeitabhängige mittlere Reservoirtemperatur

T₀: Umgebungstemperatur ~25° C

Damit gilt für die zeitliche Änderung der Entropie im Wellhead:

$$\frac{dS_{WH}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} = \dot{m}_{C^*} c_C + \dot{m}_{W^*} c_W \quad (\text{Gl. 8})$$

3.2 Entropiefluß im PPS

In das PPS fließt der Strom von Öl und Wasser aus dem Wellhead. Es fließt keine Entropie mit der Materie hinaus, da das Öl Umgebungstemperatur hat.. Die mit dem Massestrom in das PPS kommende Wärme Q und Entropie werden an die Umgebung abgegeben (negatives Vorzeichen) . Nach dem zweiten Hauptsatz entstehen Irreversibilitäten im Gesamtsystem; daher verbleibt der Term dafür in der Gleichung.

Die für das PPS gültige Gleichung 3 wird damit zu:

$$\frac{dS_{PPS}}{dt} = - \frac{\dot{Q}}{T} - \dot{m}_{C^*} c_C - \dot{m}_{W^*} c_W + \dot{\sigma}_{PPS} \quad (\text{Gl. 9})$$

mit den noch zu bestimmenden Termen

$$\frac{\dot{Q}}{T} \quad \text{und} \quad \dot{\sigma}_{PPS}$$

3.3 Entropiefluß im Gesamtsystem

Im Gesamtsystem ist der Entropiefluß S_{TOT} die Summe aus den Entropieflüssen von Wellhead und PPS. Im Gesamtsystem heben sich die Materieflüsse auf. Da der Entropiezuwachs in den Irregularitäten des PPS eingerechnet ist, ist die zeitliche Änderung der Entropie gleich Null.

$$\frac{dS_{TOT}}{dt} = \frac{dS_{WH}}{dt} + \frac{dS_{PPS}}{dt} = - \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{\sigma}_{PPS} = 0 \quad (\text{Gl. 10})$$

Damit gilt für die zeitliche Änderung der Irreversibilitäten:

$$\frac{\dot{Q}}{T} = \dot{\sigma}_{PPS} \quad (\text{Gl. 11})$$

Die Irreversibilitäten multipliziert mit der Temperatur ergeben eine Energieform. Diese Energie entspricht der Entropiezunahme des Gesamtsystems. Sie ist von außen aufzubringen, indem Energie in das PPS gesteckt wird. Wir nennen sie E_{TP}

$$E_{TP} = \int_t \dot{E}_{TP} dt = \int_t T \dot{\sigma}_{PPS} dt = \int_t \dot{Q} dt = \int_t [(T_R - T_0)^* (\dot{m}_{C^*} c_C + \dot{m}_{W^*} c_W)] dt \quad (\text{Gl. 12})$$

Zur Ermittlung von E_{TP} braucht man daher:

1. Die Reservoirtemperatur als Funktion der Zeit
2. Den Massestrom vom Rohöl als Funktion der Zeit
3. Den Wasseranteil bei der Ölförderung als Funktion der Zeit

3.4 Reservoirtemperatur

Die Reservoirtemperatur wird bestimmt durch die Tiefe der Bohrung. HG hat die bei der EIA gespeicherten Daten der US-Ölquellen gegen die Zeit ausgewertet und in ein Diagramm eingetragen und durch eine Gerade gefittet. Im folgenden Diagramm ist der Fit dargestellt. Wie bei den folgenden Diagrammen ist der Fit in die Zukunft extrapoliert.

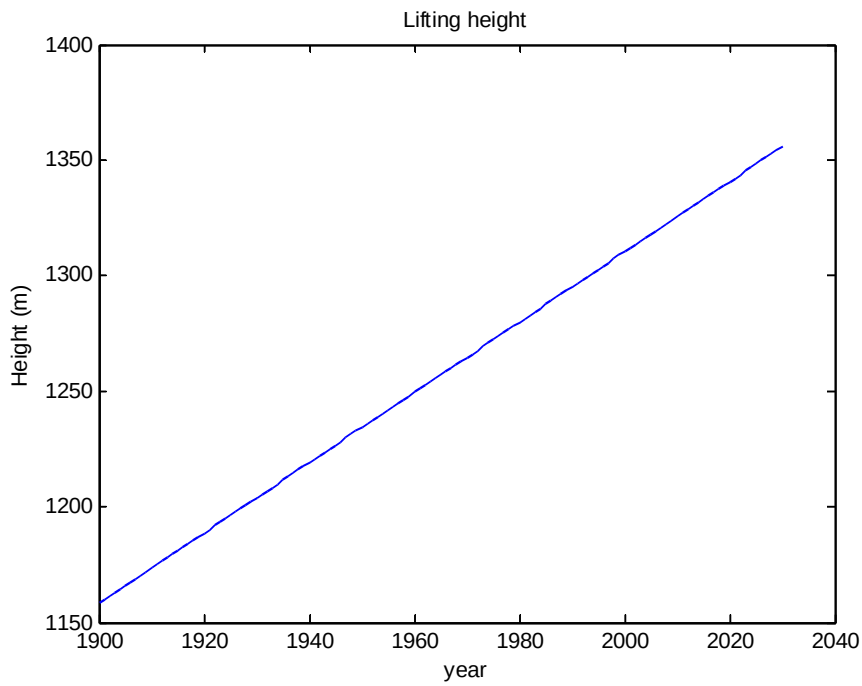


Abbildung 2: Mittlere Bohrlochtiefe bzw. Pumphöhe als Funktion der Zeit

Der Temperaturgradient in der Erde ist ca. 35 K pro 1000 m. Damit ergibt sich die folgende Kurve. Sie zeigt die mittlere Temperaturdifferenz zur Standard Referenz Umgebungstemperatur von 25°C (= 298 K) am unteren Ende der Bohrlöcher.

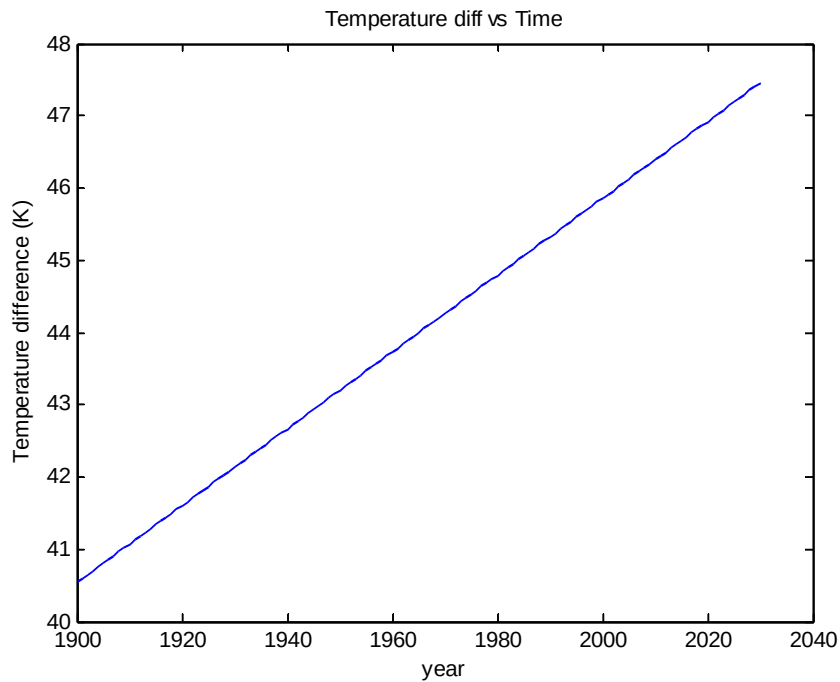


Abbildung 3: Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Bohrlochboden und Bohrlochkopf als Funktion der Zeit

3.5 Rohölförderung

Der weltweite Förderung von Rohöl als Funktion der Zeit m_c ist eine sehr gut dokumentierte Größe – die Datenbank der EIA enthält diese Kurve. Die HG benutzt einen Fit an diese Daten. Der Fit enthält nur die Daten von konventionellen Öl; Shale Oil, Teersand, Tiefseeöl, Bioethanol usw. sind nicht berücksichtigt. Daher ist das Maximum dieser gefitteten Kurve etwa im Jahr 2003.

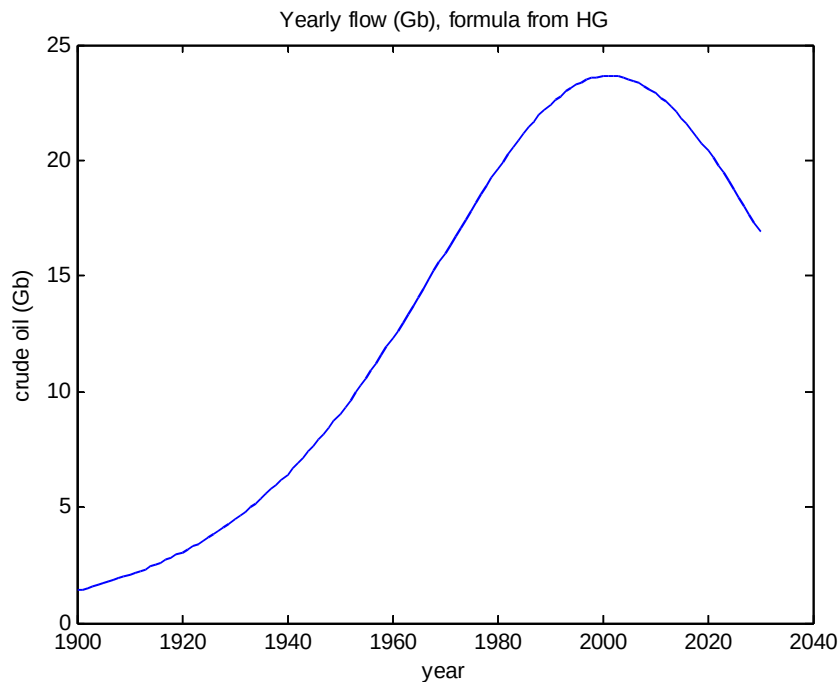


Abbildung 4: Jährliche Ölförderung von konventionellem Öl, Fit nach HG

Da nur konventionelles Öl berücksichtigt wird, gelten die Berechnungen von ETP auch nur für konventionelles Öl.

3.6 Wasseranteil

Der Wasseranteil als Funktion der Zeit ist deutlich schwieriger zu bestimmen als die Förderkurve. Es gibt eine Funktion des Wasseranteils als Funktion des Depletiongrades (im Skript der HG); aber die mittlere Depletion der Felder als Funktion der Zeit ist unbekannt. Außerdem ist die Kurve des Wasseranteils als Funktion der Depletion nicht linear. Durch Auswertung vieler Daten über Ölfelder hat die HG den mittleren Wasseranteil im Jahre 2012 zu 47% ermittelt. Der Wasseranteil wird von den Ölförderern immer als Prozent von Liter Wasser zu Liter Öl angegeben. Um den Massestrom zu ermitteln ist der Anteil in Kg Wasser pro kg Öl zu berechnen. Da die Dichte des Wassers höher ist als die von Öl, wird bei 47% Volumenanteil (water cut) etwas über ein kg Wasser pro kg Öl gefördert. Eine aus der Depletion-Kurve bestimmte Kurve, die einem Volumenanteil von 47% Wasser in 2012 hat, ist in folgendem Diagramm dargestellt.

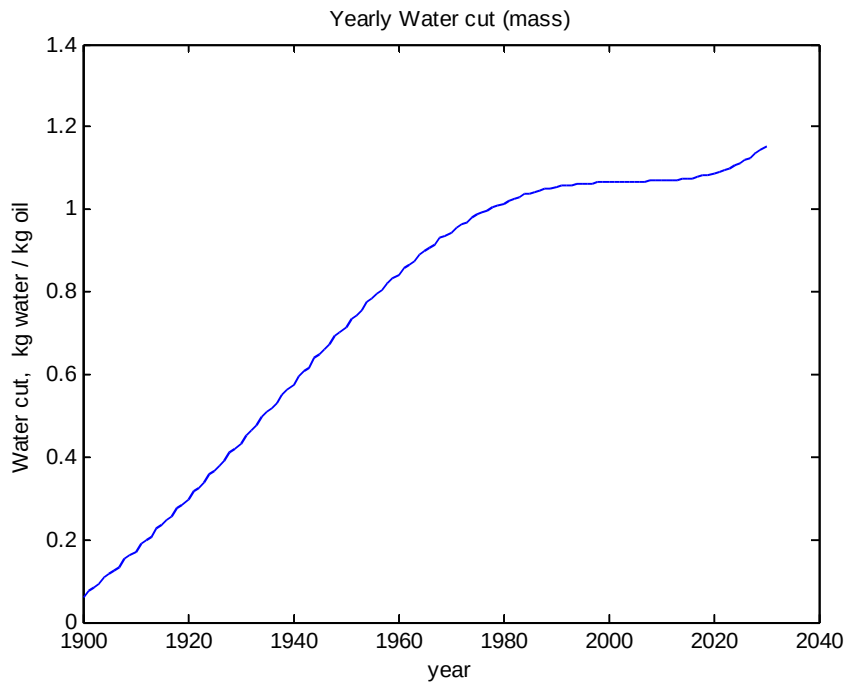


Abbildung 5: Mittlerer Wasseranteil als Funktion der Zeit

3.7 ETP-Berechnung

Die Ausdrücke auf der rechten Seite als Funktion der Zeit sind somit bekannt; aus ihnen kann man ETP pro kg Öl e_{TP} als Funktion der Zeit bestimmen:

$$e_{TP} = \frac{\int_t \dot{E}_{TP}}{\int_t \dot{m}_C} \quad (\text{Gl. 13})$$

Die sich ergebende Kurve ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die grüne Gerade zeigt die thermische Energie pro kg Rohöl. Die rote zeigt die theoretisch maximal nutzbare Exergie pro kg Rohöl, die schwarze die praktisch nutzbare Exergie.

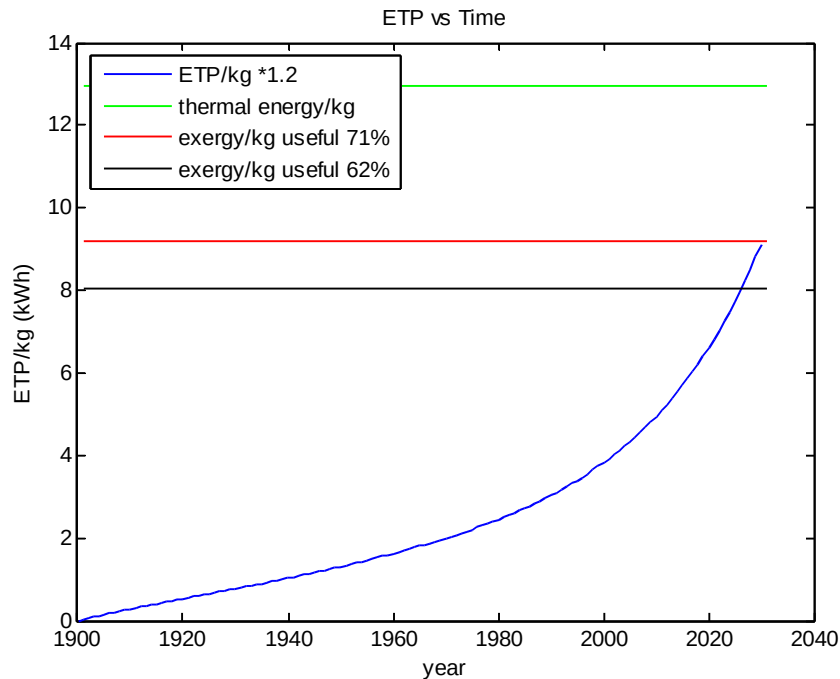


Abbildung 6: ETP als Funktion der Zeit

Die blaue Kurve zeigt e_{TP} als Funktion der Zeit, allerdings mit dem Faktor 1,2 multipliziert. Den Wert 1,2 habe ich gewählt, damit der Schnittpunkt der Kurve mit der 71%-Geraden derselbe wie bei der HG ist. Eine Abweichung von 20% bei den relativ einfachen Annahmen ist durchaus zu erwarten; ein höherer Wasseranteil kann einiges ausmachen.

Die HG hat wesentlich mehr und genauere Daten zum Öl als ich. Ich zeige das Prinzip der Herleitung, die Diagramme der HG halte ich für genauer als meine.

Wenn man den Faktor 1,2 weglässt, trifft die blaue Kurve 5 Jahre später auf die rote Gerade.

Die blaue Kurve trifft im Jahr 2029 auf die rote Gerade. Das bedeutet, im Jahr 2029 ist die für die Förderung Rohöl notwendige Energie im Mittel genauso groß wie die theoretisch nutzbare Exergie des Rohöls. Ab dann ist Rohöl kein Energielieferant mehr. Rohöl kann dann nur noch gefördert werden, wenn man andere Energiequellen dafür nutzt.

3.8 Diskussion der ETP

Manche Aussagen des ETP-Modells sind einfach zu verstehen. Das die Gesamtenergie zur Ölförderung deutlich höher als die an der Quelle nötige Energie ist, leuchtet sofort ein, denn z.B. für Raffinierung und Transport sind ebenfalls Energien notwendig.

Ebenso ist klar, dass die zur Rohölförderung notwendige Energie steigen muss, denn Horizontalbohrungen, Wasser und CO₂- Einpressen, der Übergang zu kleineren Ölfeldern, Förderung von Schwefel – oder Schwermetallhaltigem Öl machen die Förderung energieaufwendiger.

Aber sind die berechneten Werte nicht viel zu hoch ? Wenn man die Arbeiten von Charles Hall betrachtet, (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856>) kommt man auf Werte in ähnlicher Größenordnung. In dem im genannten Artikel gezeigten Diagramm kommen von 100 MJ geförderter Energien nur 20 MJ beim Konsumenten an. Also ist festzustellen, dass sehr hohe Werte auch an anderer Stelle genannt werden.

Aber einen Punkt der ETP- Berechnung kann man durchaus als unanschaulich bezeichnen. Warum hat die aus dem Bohrloch transportierte Wärme etwas mit der Energie zu tun, die man zur Erdölförderung braucht ? Ich gestehe, dass ich für diesen Punkt noch keine schlüssige Antwort habe. Aber der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik sind gültig, und gegen physikalische Gesetze kann man nicht verstoßen. Und wenn diese Gesetze etwas über Energie aussagen, ist das Ergebnis zu akzeptieren.

4 ETP und EROI

EROI steht für Energy Return on Energy invested, und bezeichnet den energetischen Erntefaktor. Die HG benutzt den Ausdruck EROI in Verbindung mit der Produktions-Energie E_p , die die Ölförderer selbst aufbringen. Um die Energie E_p zu bestimmen, wird folgender Weg beschritten:

- a) Für jedes Jahr wird ein Umrechnungsfaktor Dollar zu Energie bestimmt
- b) Der Weltmarktpreis des Rohöls in \$/Barrel wird in Energie/Barrel umgerechnet. Diese Energiemenge wird als E_p verwendet. Diese Berechnung erfolgt unter den Annahmen, dass Ölförderer genau wie alle anderen Verbraucher die Weltmarktpreise für Energie bezahlen müssen, und dass in erster Linie Energie Kosten bei der Ölförderung verursacht.
- c) EROI ist der Quotient aus Thermischer Energie des Rohöls und Produktionsenergie.

4.1 Der Umrechnungskurs Dollar zu Energie

Der Umrechnungsfaktor Energie zu Dollar ist in Abbildung 7 dargestellt. Es stammt von der HG. Zur Vereinfachung der Umrechnung sind zusätzlich Daten in kWh ergänzt. Die Datenwerte kann man nachschlagen unter http://de.theglobaleconomy.com/rankings/Energy_per_GDP/ . Bei diesem Diagramm werden die Dezimalstellen durch Punkte abgetrennt, so wie es im englischen Sprachraum üblich ist.

Das Diagramm basiert auf Daten zum globalen BIP, im englischen Gross Domestic Product oder hier Global Domestic Product genannt, sowie der globalen Energieproduktion. Es zeigt den Quotienten Energieproduktion zu GDP. Mit Hilfe dieses Quotienten kann man den Preisen pro Barrel Energien pro Barrel zuordnen.

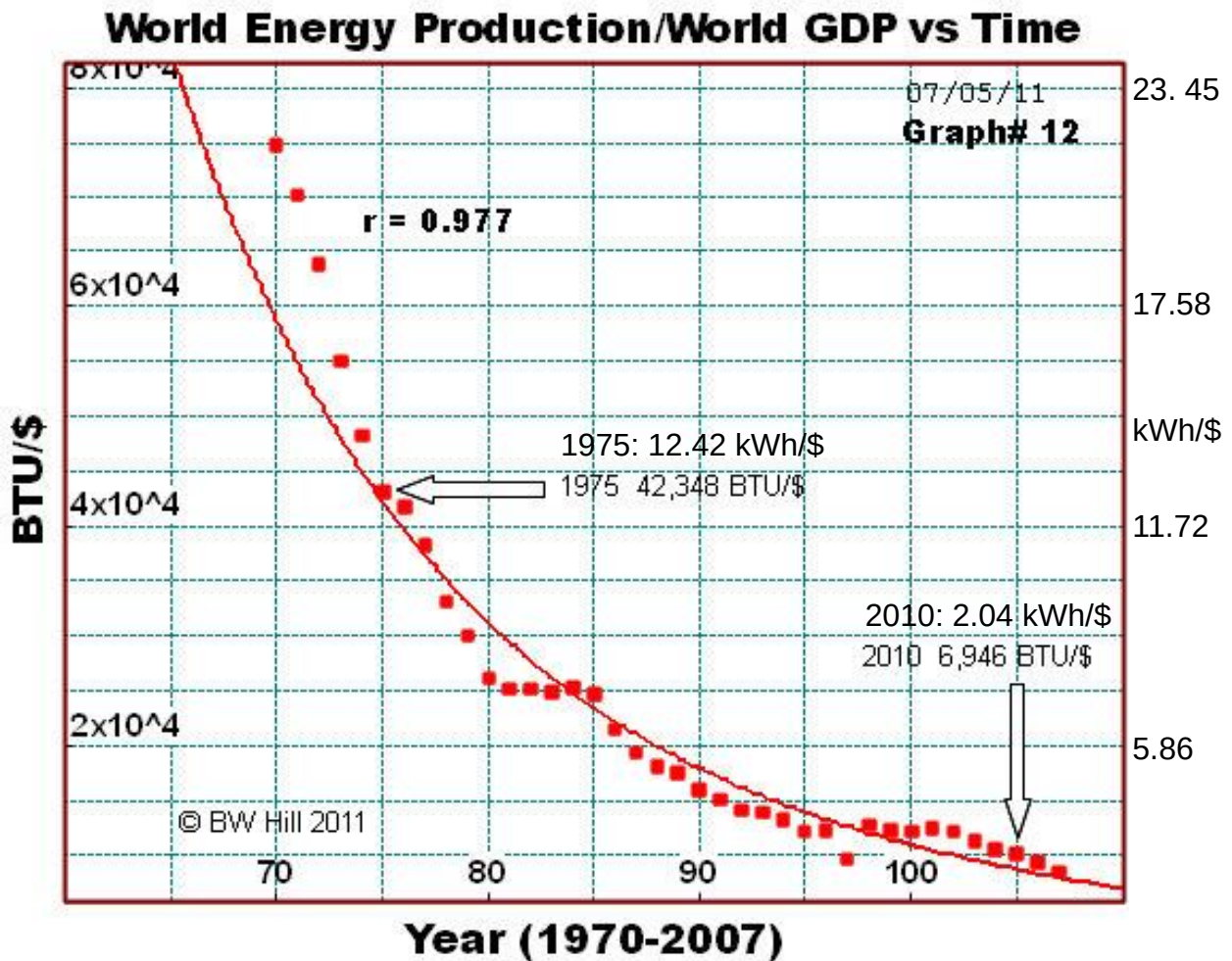


Abbildung 7: Der Quotient aus Weltenergieproduktion durch Welt BIP

Das Diagramm zeigt, dass im Lauf der Zeit immer weniger Energie benötigt wird, um einen Dollar GDP zu erzeugen, der fallende Verlauf der Kurve ist ein Folge des technischen Fortschritts. Das Diagramm ist aber nicht so zu verstehen, die entsprechende Geldmenge für die Erzeugung der Energie notwendig ist, oder das der Verbraucher den angezeigten Geldwert für seine Energie bezahlt.

Im Normalfall gibt der Verbraucher weniger Geld für die Energie aus, als die Kurve zeigt. Wenn er die angezeigte Geldmenge für seine Energie bezahlen müsste, müsste er sein gesamtes Einkommen für Energie aufwenden, und könnte sonst nichts mehr kaufen. Die Kurve ist also für den Verbraucher eine Grenzkurve und stellt das Maximum dar, dass er für Energie bezahlen kann. Der Quotient „World Energy Production / GDP“ zeigt folglich eine Obergrenze für den mittleren Energiepreis. Steigt der Preis zu diesem Wert, kann fast keiner mehr diesen Preis bezahlen.

4.1.1 Energieverbrauch in Deutschland

Zum Vergleich ein paar Zahlen: Deutschland hat einen Energieverbrauch von 13077 PJ im Jahr bei 80,62 Mio Einwohnern. Pro Kopf ist der Energieverbrauch etwa 123 kWh/Tag bzw. 5,1 kW rund um die Uhr.

Hätte jeder Einwohner einen Preis von 2,04 kWh /\$ gleich 2,2 kWh/Euro bezahlen, wären 56 Euro am Tag pro Kopf fällig.

Wenn man nur den Preis pro Liter Benzin betrachtet, erscheinen hohe Preise selbst von 4-6 Euro/Liter manchem tolerabel, aber bei dem hohen Gesamtverbrauch bestimmt nicht mehr.

4.2 Der Weltmarktpreis für Rohöl

Abbildung 8 zeigt die mittleren Ölpreise für die Jahre 1946 bis 2014. Die Werte stammen aus: http://inflationdata.com/inflation/inflation_rate/historical_oil_prices_table.asp und sind WTI-Preise. Die Preise sind nicht inflationskorrigiert. Eine Inflationskorrektur ist überflüssig, da die damaligen Werte zur Bestimmung der Energien zur Förderung von Barreln E_p nach dem damaligen Stand verwendet werden sollen.

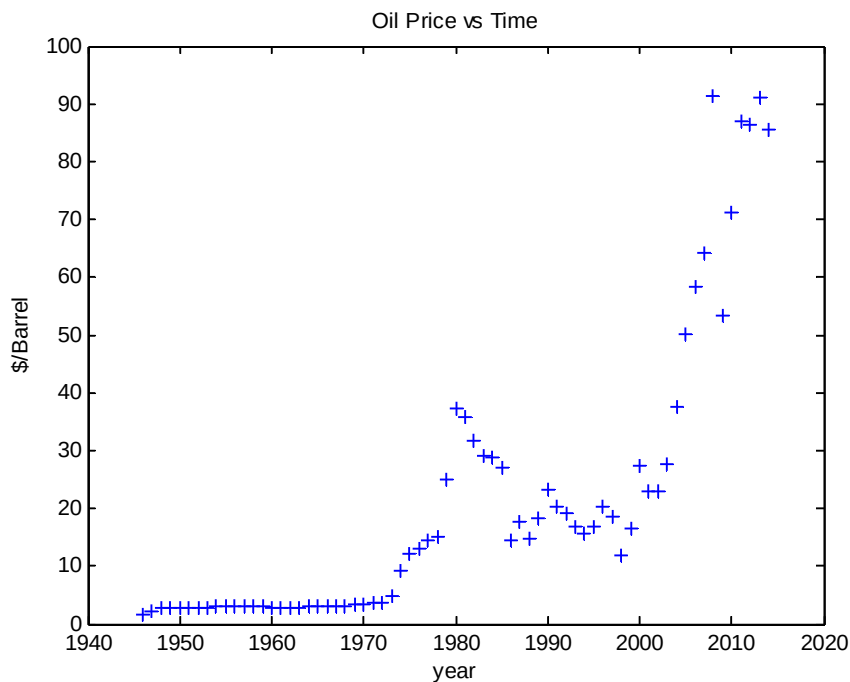


Abbildung 8: Ölpreis als Funktion der Zeit

Wenn man die Preise pro Barrel mit den Werten aus der Energie/GDP Kurve multipliziert wird, ergeben sich die Energiewerte pro Barrel in Abbildung 9 (blaue Kreuze). Dies Energiewerte sind die Produktionsenergie pro Barrel.

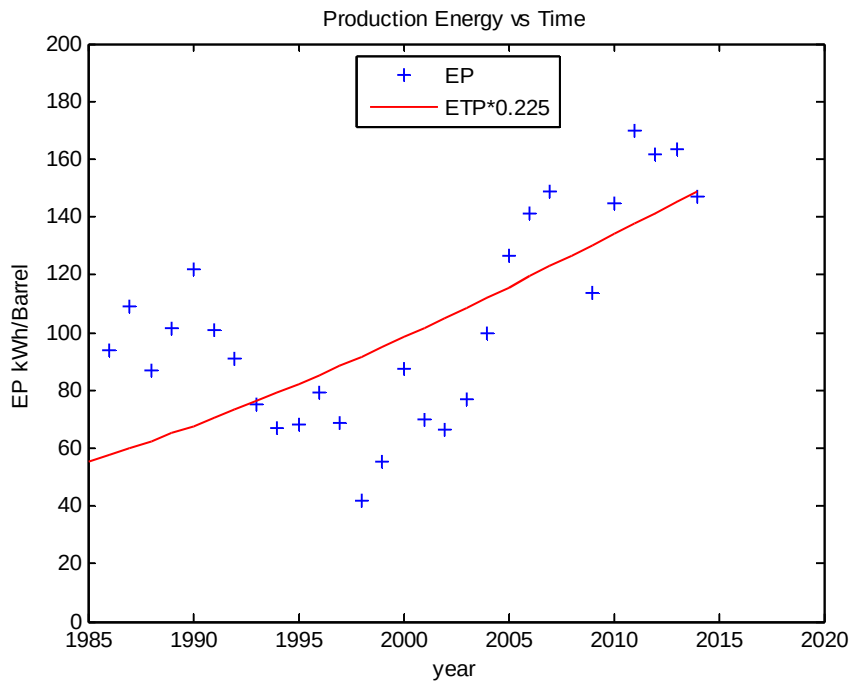


Abbildung 9: Produktionsenergie als Funktion der Zeit

Die rote Linie ist kein Fit an die Kreuze, sondern zeigt eine Kurve mit 22,5% der ETP-Werte aus Abbildung 6, multipliziert mit 137 kg/Barrel. Dieses Diagramm sagt aus, dass 22,5 % der Totalen Produktions-Energie als Energie (im Mittel) bei der Förderung aufgebracht werden müssen. Die genaue Rechnung der HG ergibt 20,5%.

$$E_P = 0,205 \cdot E_{TP} \quad (\text{Gl. 14})$$

20,5 % ist größenordnungsmäßig identisch mit dem Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren. Die Ähnlichkeit kommt nicht durch Zufall, sondern liegt daran, dass zur Ölförderung in erste Linie Verbrennungsmotoren eingesetzt werden.

Im Jahr 2015 ist die spezifische Energie e_{TP} pro kg etwa 5,53 kWh/kg. 22,5% davon sind 1,24 kWh/kg.

Wenn man die thermische Energie von 12,97kWh/kg vom Rohöl durch 1,24 kWh/kg teilt, erhält man 10.42. Der Wert entspricht dem EROI-Wert für konventionelles Öl im Jahre 2015.

5 Zusammenfassung der ETP-Bestimmung

Es wurde dargestellt, wie die HG mittels der Thermodynamik die Gesamtenergie ETP zur Förderung von Öl bestimmt. Die gesamte Produktionsenergie ist die Summe ansonsten schwer ermittelbarer Energien, wie Energie zum Bohren der Quellen, für die Fertigung der Stahlrohre, Pumpen, Fahrzeuge, Gebäude, Straßen. Energie zum Pumpen von Öl und Wasser, Energie zum Raffinieren des Öls, zum Transport usw.

Es ergeben sich zeitlich stark ansteigende Werte für ETP. Von der im Rohöl enthaltenen thermischen Energie kann man nur einen gewissen Anteil, die Exergie nutzen. In 15 Jahren (2030) ist die zur

Produktion notwendige Energie so hoch wie die Exergie. Ab dann ist mehr Energie zur Erdölförderung nötig als im Öl enthalten ist. Ab dann macht Ölförderung energetisch keinen Sinn mehr.

Der Vergleich des Energieanteils, der an der Ölquelle selbst erforderlich ist, mit den als EROI bekannten Werten, ergibt durchaus vergleichbare Daten.

6 Folgerungen aus der hohen Förderenergie

Nur wenige Folgerungen will ich hier nennen:

1. Die verbleibenden Ölreserven werden nicht nur durch die Geologie bestimmt, und auch nicht durch die wirtschaftlich förderbaren Reserven, sondern durch die Physik.
2. Deshalb sind die verbleibenden Welt-Ölreserven deutlich niedriger als von vielen Autoren geschätzt und liegen z.B. unter den von Jean Laherrere angenommenen. Die HG sagt, dass 84 % des energetisch förderbaren Öls bereits verbraucht sind.
3. Unkonventionelle Ölquellen wie Teersand, Shale oil oder polares Öl können nicht Nachfolger der konventionellen werden, da sie mehr Förderenergie als konventionelles Öl benötigen.
4. Ölförderung benötigt einen Großteil der im Öl enthaltenen Energie selbst, so dass das Aufrechterhalten der für die allgemeine Wirtschaft verfügbaren Ölmenge jährlich eine Förderquotenerhöhung um etwa 1,2 % notwendig macht.

7 Das ETP-Modell und der Ölpreis

In diesem Kapitel wird die Auswirkung der ETP-Berechnung der Hillsgroup (HG) (<http://www.thehillsgroup.org/index.html>) auf den Ölpreis erläutert. ETP ist die thermodynamisch berechnete Energie der Totalen Produktion. Es ist klar, je höher der Aufwand bei der Ölförderung ist, desto teurer wird das Öl. Doch wann wird sie für den Normalmenschen unbezahlbar? Wirtschaftsfachleute sagen gerne, Öl wird solange gefördert, wie es wirtschaftlich ist. Die Frage ist also, ab wann ist Ölförderung wirtschaftlich nicht mehr möglich? Wirtschaftsexperten werden nebulös, wenn es um die Antwort auf diese Frage geht.

7.1 Der Umrechnungskurs Dollar zu Energie

Der Umrechnungsfaktor Energie zu Dollar wurde schon erwähnt. Er ist in Abbildung 7 (abgeleitet von http://www.thehillsgroup.org/depletion2_008.htm) dargestellt. Die Datenwerte kann man nachschlagen unter http://de.theglobaleconomy.com/rankings/Energy_per_GDP/

Das Diagramm basiert auf Daten zum globalen BIP, im englischen Gross Domestic Product oder hier Global Domestic Product genannt, sowie der globalen Energieproduktion. Es zeigt den Quotienten Energieproduktion zu GDP. Mit Hilfe dieses Quotienten kann man den Preisen pro Barrel Energien pro Barrel zuordnen. Für jedes Jahr gibt es einen Preis pro Energieeinheit.

7.2 Die Obergrenze für den Rohölpreis

Im Jahr 2010 entsprachen 2,04 kWh einem Dollar. Ein Kilogramm Rohöl mit 12,97 kWh Energieinhalt entsprach 6,35 \$.

Etwa 40% des Weltenergieverbrauchs wird heute durch Rohöl gedeckt.

Stellen wir uns vor, 40% der Weltbevölkerung verwenden nur Rohöl für ihren Energiebedarf, die anderen 60 % verwenden ausschließlich andere Energieformen, und betrachten nur noch die 40%. Sind die 40% der Weltbevölkerung in der Lage, 6,35 \$ für das kg Rohöl zu bezahlen? Die Antwort kann nur nein sein (siehe Kap. 4.1.1). Würde tatsächlich so viel bezahlt werden, könnten die 40% nichts anderes mehr außer Rohöl mit ihrem Einkommen bezahlen, für ihren Lebensunterhalt bliebe nichts mehr übrig. Einzelne könnten das Geld vielleicht aufbringen, aber die Masse der Menschen nicht. Der Quotient „World Energie Production / GDP“ zeigt die Obergrenze für den (mittleren) Energiepreis bzw. Ölpreis. Steigt der Preis zu diesem Wert, kann fast keiner mehr diesen Preis bezahlen. Öl wird unbezahlbar teuer.

Dasselbe gilt auch, wenn man einen Teil seiner Energie aus Öl gewinnt und den Rest aus anderen Energieformen. Der Quotient gibt eine Obergrenze an.

Nehmen wir an, der Verbraucher erhält nur 50 % der Energie des Öls, oder anders gesagt, er erhält von zwei Barreln (kg) nur eins. Das zweite Barrel (kg) benutzt eine Firma „XYZ“, um das Öl zu Benzin für den Verbraucher in einer Raffinerie aufzubereiten. Die Ölaufbereitung ist natürlich auch vom Verbraucher (von vielen Verbrauchern) zu bezahlen, irgendwo muß das Geld herkommen. Also erhält der Verbraucher ein kg, bezahlt aber zwei. Er kann dann nur 3,17 \$ pro kg zahlen, mehr übersteigt seine finanziellen Möglichkeiten. Das Geld für das zweite kg wird er auch los, und zwar an „XYZ“. Da er sein Benzin nicht vom Ölförderer bekommt, sondern an der Tankstelle, zahlt er pro kg den doppelten Preis. Die maximalen Handelspreise pro Barrel Rohöl werden durch diesen Effekt auf 50% reduziert.

Der Raffineriebetreiber ist nicht der einzige, der sich seinen Energieaufwand vom Verbraucher bezahlen läßt. Der Staat nimmt Steuern, um Straßen zu bezahlen (zum Fahren und Öltransport), der Lebensmittelhändler nimmt Geld, um seine eigenen Energiekosten zu begleichen usw.

Ein Großteil des Geldes, das für Energie ausgegeben wird, wird indirekt bezahlt.

Zusammengefasst: die Quotientenkurve gibt zwar eine Obergrenze vor, aber die tatsächlich zahlbaren Preise werden erst weiter unten bestimmt.

7.3 Energieanteil des Endverbrauchers

Der Energieanteil des Verbrauchers ist der Kurve „ETP vs Time“ zu entnehmen. Diese Kurve wurde in Abbildung 6 dargestellt. Für den Verbraucher steht die Differenz aus:

- praktisch nutzbarer Exergie und
- Anteil der Ölförderer zur Verfügung.

Sie ist die Differenz aus der schwarzen Gerade und der blauen Kurve in Abbildung 6.

Während im Jahr 2000 von der thermischen Energie von 12,97 kWh/kg des geförderten Rohöls noch etwa 4 kWh/kg beim Endverbraucher ankamen, sind es im Jahr 2015 nur noch 2 kWh/kg.

Ab hier möchte ich statt eigener Diagramme und Zahlen diejenigen der HG verwenden, die ich für genauer halte. Speziell bei Diskussionen um den Preis kann es für Leser sehr verwirrend sein, wenn für eine Ware zwei Preise aufgrund unterschiedlicher Rechnung genannt werden.

Das erste wichtige Diagramm der HG ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist im Grunde dieselbe Darstellung wie Abbildung 6, aber mit imperialen Einheiten. Die ETP-Kurve ist in dieser Darstellung weiter in die Zukunft extrapoliert und nähert sich asymptotisch an die grüne Gerade an.

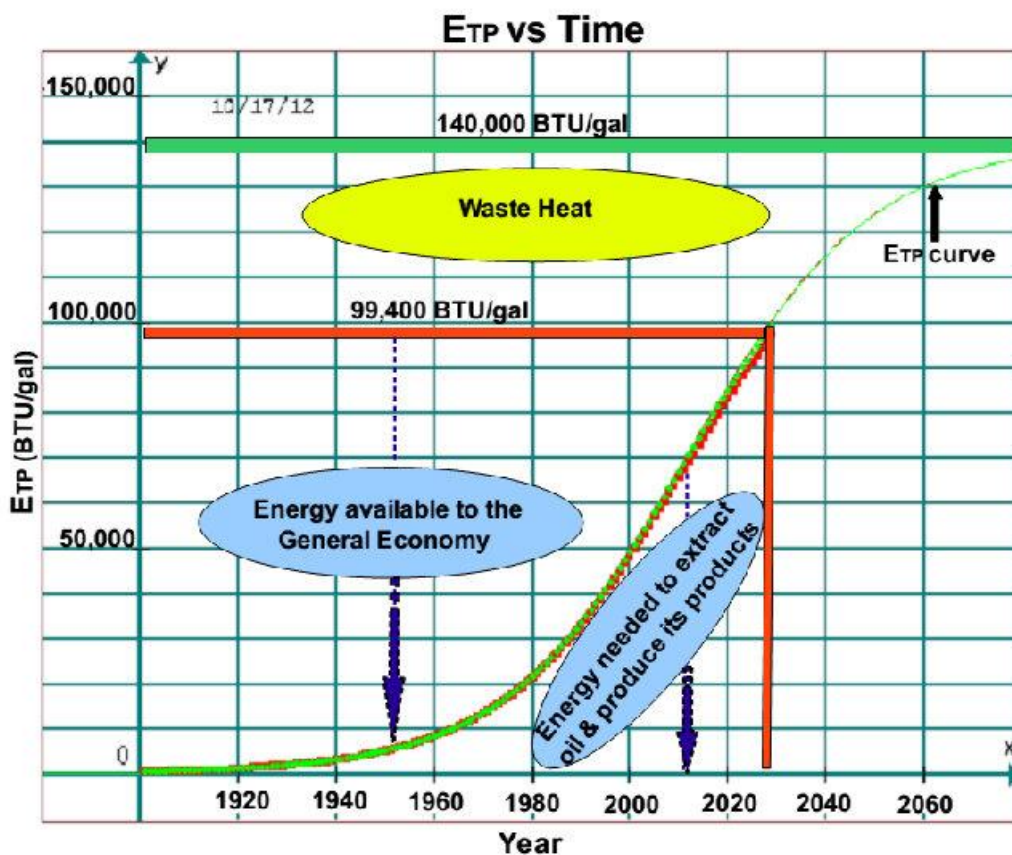


Abbildung 10: Diagramm der HG für ETP (http://www.thehillsgroup.org/depletion2_020.htm)

Wie in der Grafik gezeigt, erforderte es im Jahr 1960 etwa 8600 BTU/gal (= 0,8 kWh/kg) um eine Gallone Rohöl zu fördern, verarbeiten und die Produkte zu verteilen. Im Jahr 2012 ist der Wert auf 70900 BTU/gal (= 6,57 kWh/kg) gestiegen. Von einem Kilo Rohöl mit 8 kWh Exergie bekam der Verbraucher 1960 7,2 kWh ab, 2012 bekommt er nur noch 1,43 kWh.

1960 war Öl entsprechend einer Energie von ca. 40 kWh für einen Dollar zu bekommen (Abbildung 7), 2012 sind es nur noch ca. 1,95 kWh.

1960 konnte der Verbraucher $137 \text{ kg} * 7,2 \text{ kWh/kg} / 40 \text{ kWh/\$} = 24,6$ Dollar maximal für ein Barrel mit 137 kg Rohöl bezahlen, 2012 sind es $137 \text{ kg} * 1,43 \text{ kWh/kg} / 1,95 \text{ kWh/\$} = 100,5$ Dollar.

Abbildung 11 zeigt das Ölpreisdiagramm der HG, das entsprechend den Betrachtungen in Kapitel 7.2 erstellt wurde.

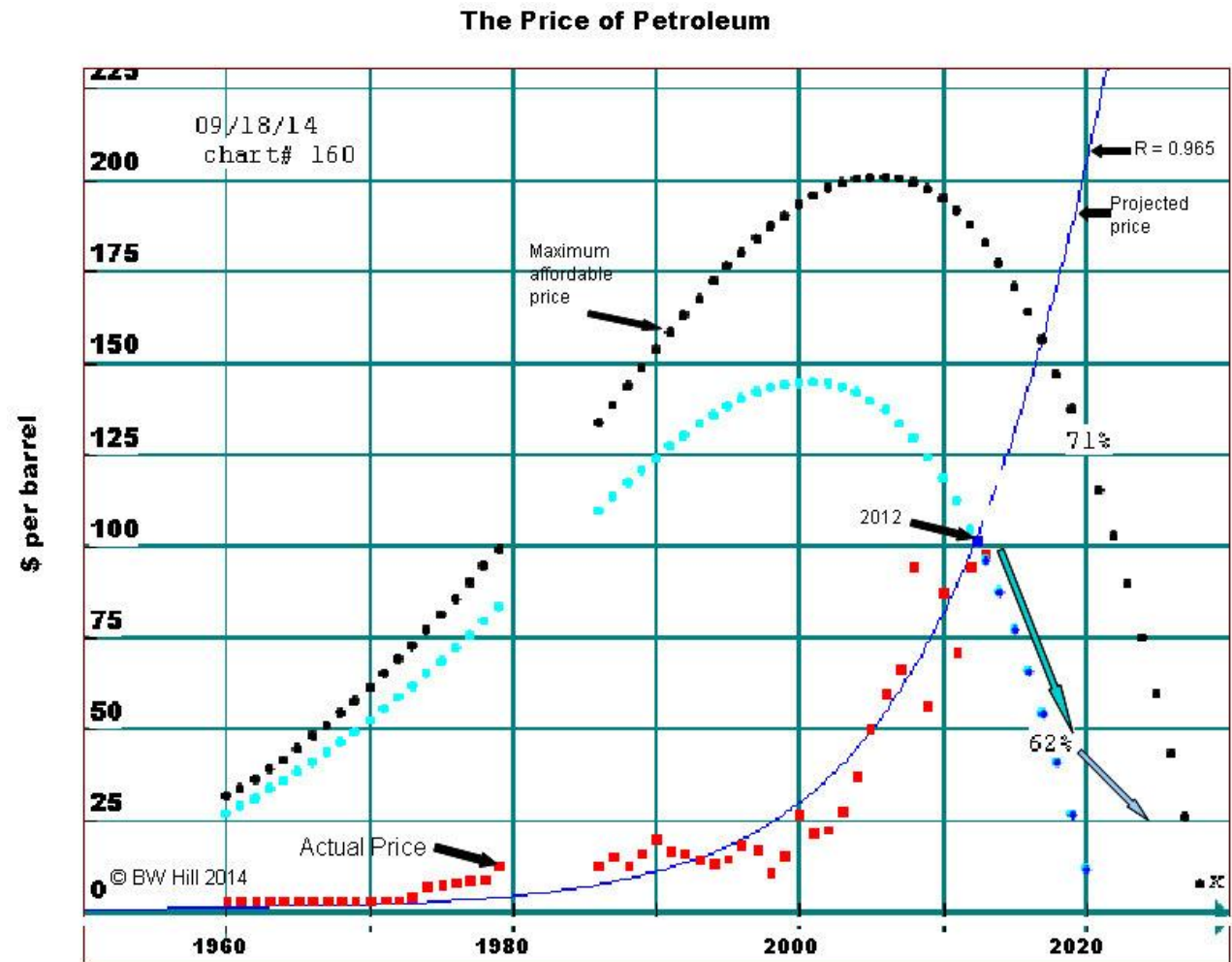


Abbildung 11: Diagramm der HG für den Ölpreis pr Barrel
<http://www.thehillsgroup.org/pasted1164.jpg>

Die roten Punkte sind die über das Jahr gemittelten historischen Ölpreise, die blaue Linie ist ein Fit an die roten Punkte, basierend auf 20,5 % Anteil von ETP. Die blaue Linie zeigt den Preis, den Ölförderer (im Mittel) brauchen, um ihren Energieaufwand zu bezahlen. Die hellblauen Punkte sind die Preise, die Verbraucher maximal zahlen können, wenn sie 62 % (praktischer Grenzwert) der im Öl steckenden Energie nutzen können. Die schwarzen Punkte sind der Maximalwert unter der Voraussetzung, dass die maximale Exergie von 71% (theoretischer Grenzwert) genutzt wird. (Die einzelnen hellblauen und schwarzen Punkte wurden wie in Kap. 7.2 berechnet).

Im Jahr 2012 passiert etwas Entscheidendes: Der vom Verbraucher zahlbare Preis trifft den Preis, den die Ölförderer brauchen. Nach 2012 brauchen die Förderer mehr Geld, als Verbraucher

bezahlen können !

Die roten Punkte liegen nicht genau auf der blauen Linie, sie schwanken. Daher ist auch nicht zu erwarten, dass nach dem Jahr 2012 sofort eine Wirkung auf den Ölpreis erkennbar wird, aber die Tendenz ist klar.

Diagramm 11 wurde von der HG kurz vor dem Sturz des Ölpreises Mitte 2014 erstellt. Am 18.9.14 ((Datum des Diagramms) lag der WTI-Preis bei etwa 90 \$.

8 Folgerungen

8.1 Vergangenheit

Die HG hat den Fall des Ölpreises vorausgesagt, wenn auch nicht das genaue Datum. Das Auslaufen von Quantitative Easing 3 in den USA fällt zeitlich ebenfalls mit dem Fall der Preise zusammen. Man kann das so interpretieren, dass die Ursache des Falls in den Energieeffekten des ETP Modell begründet wird, der Anlass für den Preissturz aber das Ende von QE3 ist.

In den Massenmedien wird immer die Überproduktion als Ursache für den Preissturz genannt, oder auch ein Preiskrieg, den Saudi-Arabien oder die Shale-Oil Förderer gestartet haben. Überproduktion ist aber die logische Folge, wenn die Preise nachgeben, denn Ölförderer müssen versuchen, durch höhere Produktion in den Gewinnbereich zu kommen. Speziell die Shale-Oil Förderer haben immer versucht, durch schnell wachsende Förderung die hohen Kreditlasten zu bedienen.

Ursache und Wirkung werden oft verwechselt, speziell wenn beide in einem Regelkreis miteinander verbunden sind.

8.2 Gegenwart

Seit über einem Jahr herrschen die niedrigen Ölpreise. Zu Anfang dieser Phase hat kaum einer der Ölexperten mit dauerhaft niedrigem Preis gerechnet. Der berechnete Maximalpreis der HG für Anfang 2015 betrug 77\$/Barrel, heute (Nov. 2015) ist er etwa 68 \$/Barrel. Der tatsächliche Preis von ungefähr 46\$ liegt deutlich tiefer. Das ETP Modell stimmt zwar tendenziell, aber nicht besonders genau. Die Hillsgroup hat für die niedrigeren Preise keine perfekte Erklärung, der permanente Geldzufluss zu den Shale-Oil Förderern könnte die Ursache sein. Würde die Shale-Oil-Förderung aufhören, könnten die Preise etwas steigen. Ein anderer Erklärungsversuch ist, dass die Ölpreise unter dem maximal zahlbaren Preis liegen müssen, damit Verbraucher noch Geld für ihren Lebensunterhalt übrig haben.

8.3 Zukunft

1. Steigt der Rohölpreis pro Barrel über die von der HG genannten Maximalwerte, so ist das ETP Modell zumindest teilweise falsch. Warten wir es ab. Da selbst Großbanken von dauerhaft niedrigen

Preisen sprechen, kann die Widerlegung lange dauern. Ich glaube nicht an eine Widerlegung.

2. Ölgesellschaften haben eine schwierige Zukunft vor sich. Shale-Förderer werden vom Markt verschwinden, ebenso Teersandförderung und Tiefseeförderung. Selbst Saudi-Arabien wird finanzielle Probleme bekommen.

3. Um zu überleben werden Ölgesellschaften die Kosten für Exploration und Investitionen zurückfahren und nur noch von der Substanz leben. Dieser Effekt ist seit 2013 zu beobachten.

4. Werden die Ölpreise steigen, wenn die Produktion abnimmt? Das ETP-Modell sagt nein, denn nach Abbildung 7 haben die Verbraucher das Geld dafür nicht. Sie werden versuchen, den Ölverbrauch zu minimieren.

5. Abnehmender Ölverbrauch, der niedrige Ölpreis und permanentes Konsumwachstum passen nicht zusammen. Eine globale Rezession ist nach dem ETP-Modell zu erwarten. Übliche Wirtschaftstheorien nennen als Folge niedriger Ölpreise eine Belebung der Weltwirtschaft, versprechen also genau das Gegenteil. Abwarten....

Hiermit möchte ich diesen Artikel beenden. Ich erwarte, dass die genannten Sachverhalte bei vielen Lesern Unglauben und Widerspruch auslösen werden. Für mich selbst ist die Basis, nämlich die thermodynamische Betrachtung, derart logisch, dass ich das gesamte HG-Modell für richtig halte.