

Energie für die nächsten Jahrzehnte

Der gesellschaftliche Konsens wächst, daß wir unser System der Energiebereitstellung und -nutzung umbauen müssen, nämlich weg von fossilen Energieträgern und hin zu regenerativen Energiequellen. Doch die Geister scheiden sich an der Frage, wann mit dem Umbau begonnen werden soll und wie schnell dabei vorzugehen ist. Die einen drängen auf einen sofortigen Beginn; die anderen beschwichtigen: Wir haben mindestens noch zwei, drei Jahrzehnte Zeit, um durch verstärkte Forschung unter den vielen Alternativen die kostengünstigen zu finden und unter den kostengünstigen Alternativen die wirksamste.

Um im hier etwas klarer zu sehen, werden sogenannte Projektionen entworfen. Projektionen sind keine Prognosen. Prognosen sagen, was bis zu einem bestimmten Zeitpunkt *de facto* eintreten wird. Projektionen sagen, was zu erwarten ist, wenn bestimmte Tatsachen vorliegen und bestimmte Annahmen gemacht werden. Hier sei eine Projektion vorgestellt, die von der Internationalen Energie Agentur (IEA) stammt¹. Die Projektion beginnt mit dem Jahr 2001 und endet mit dem Jahr 2030. Sie sucht abzuschätzen, wie sich die globale Nachfrage nach Primärenergie² entwickelt, aus welchen Quellen die Nachfrage befriedigt werden kann, wieviel einzelne Wirtschaftsblöcke (z.B. die OECD, China oder Schwarzafrika) davon für sich gewinnen können, wieviel Sekundärenergie³ sich bereitstellen läßt und anderes mehr. Die folgende Tabelle enthält die Daten für die Primärenergie. Die Maßeinheit der Projektion der Internationalen Energie Agentur ist die Tonne Öläquivalent (toe). Die entsprechenden Angaben werden umgerechnet in die hierzulande traditionelle Tonne Steinkohleneinheit (SKE: 1 t SKE = 1 toe geteilt durch 0,7).

Der Primärenergieeinsatz nimmt um gut 62 Prozent zu von 14,3 auf 23,3 Gigatonnen Steinkohleneinheiten. Die Zunahme verläuft nicht mit konstanter Wachstumsrate (Verdoppelung in gleichbleibenden Zeitabständen), sondern mit sinkenden Wachstumsraten von 1,9 über 1,7 auf 1,3 Prozent pro Jahr. Steigender Primärenergie-Einsatz ist zu erwarten, da die Weltbevölkerung bis 2030 zunimmt von 6,1 auf 8,4 Milliarden (wahrscheinlich eher weniger), dies ebenfalls mit abnehmenden Wachstumsraten. Zudem nimmt global auch der Wohlstand zu, sichtbar am steigenden Verbrauch pro Kopf von 2,35 auf 2,77 Tonnen Steinkohleneinheiten. Die Korrelation zwischen Energieverbrauch und Wohlstand ist gewiß nicht starr. Die USA verbrauchen an Energie pro Kopf mehr als das Doppelte wie die Schweiz; man kann aber nicht sagen, daß Wohlstand und Wohlfahrt in den USA doppelt so hoch seien wie in der Schweiz. Anderseits müssen die USA sehr viel wohlhabender sein

	1973	2001		2010		2030				
	r 1973 bis 2001	Gt SKE	Anteil in %	r 2001 bis 2010	Gt SKE	Anteil in %	r 2010 bis 2020	r 2020 bis 2030	Gt SKE	Anteil in %
neu regen.	5,75	0,07	0,5		n.a.	n.a.			n.a.	n.a.
alt regen.	1,75	1,56	10,9	1,34	1,87	10,9	1,42	0,89	2,35	10,1
Wasser	2,53	0,32	2,2	2,33	0,40	2,3	1,26	1,27	0,51	2,2
Atom	9,09	0,99	6,9	0,81	1,07	6,2	-0,25	-0,43	1,00	4,3
nicht-fossil	3,20	2,94	20,5	1,27	3,34	19,4	0,90	0,58	3,87	16,6
Erdgas	2,77	3,04	21,2	2,74	4,00	23,1	2,38	1,71	6,01	25,8
Erdöl	0,91	5,01	35,0	1,96	6,10	35,3	1,70	1,30	8,24	35,4
Kohle	1,59	3,34	23,3	1,44	3,85	22,3	1,66	1,23	5,15	22,1
Fossil	1,53	11,39	79,5	2,03	13,95	80,7	1,89	1,41	19,40	83,3
pE total	1,82	14,33	100,0	1,88	17,29	100,1	1,71	1,27	23,27	99,9
Pro Kopf	2,24	2,35 t SKE			2,51 t SKE				2,77 t SKE	

Tab. 1

IEA-Projektion des Einsatzes von pE (= Primärenergie) von 2001 bis 2030; 1 Gt (= Gigatonne) = 1 Milliarde Tonnen; alt regen(erativ): herkömmliche regenerative Energie wie Biomasse, Müll und Wasser (letzteres ist gesondert ausgewiesen); neu regen(erativ): Energie wie Wind- und Sonnenenergie; r: Wachstumsrate in Prozent pro Jahr im entsprechenden Zeitraum (kursiv gesetzt); n.a.: nicht angegeben. Unstimmigkeiten gehen auf Rundungen zurück.

als Bangladesch, setzen sie doch pro Kopf 50 mal mehr (kommerzielle) Energie ein als das Entwicklungsland Bangladesch.

Nun ist wichtig zu sehen, daß der (sinnvolle) Einsatz von Energie pro Kopf und damit auch der damit verbundene Wohlstand in den armen Ländern schneller zunimmt als in den reichen. Nähme der Wohlstand in allen Ländern in gleichem Maß zu, zum Beispiel um drei Prozent pro Jahr, würden *alle* reicher, aber der Graben zwischen den armen und reichen Ländern würde ebenfalls um drei Prozent, würde also vertieft. Soll die extreme Armut in der Welt überwunden und der besagte Graben zwar nicht geschlossen, aber doch spürbar verkleinert werden, müssen die ärmsten Länder sehr viel stärker wachsen als die schon reichen. Auch dieser Zusammenhang wird in der Internationalen Energie Agentur-Projektion berücksichtigt.

Insgesamt wird man sagen können, daß die Projektion wohlüberlegt und recht plausibel ist. Verliefe die künftige Entwicklung in diesen Bahnen, könnten wir uns um 2030 durchaus beglückwünschen. In einem Punkt allerdings überrascht die Projektion: Der Anteil der fossilen Energieträger nimmt nicht ab, sondern sogar von 79,5 auf 83,3 Prozent zu, und der Anteil nicht-fossiler Energiequellen steigt nicht, sondern schrumpft von 20,5 auf 16,6 Prozent, auch wenn er mengenmäßig zunimmt von 2,94 auf 3,87 Gigatonnen Steinkohle-Einheiten. Offensichtlich sind die Urheber der Projektion der Meinung, daß wir uns mit dem eingangs erwähnten Umbau Zeit lassen können, mindestens bis 2030. Das ist durchaus fraglich, denn die kommende Entwicklung *kann* wahrscheinlich gar nicht so verlaufen wie projektiert, und sie *darf* auch nicht so verlaufen wie projektiert.

Grenzen der Erdölreserven

Die Automobilclubs versichern ihren Mitgliedern regelmäßig, sie bräuchten kein schlechtes Gewissen zu haben, mit benzindurstigen Geländewagen einkaufen zu gehen, denn es gäbe in diesem Jahrhundert mehr als genügend Erdöl. Werde der Treibstoff exorbitant teuer, dann aus politischen, nicht aus geologischen Gründen. Auf der anderen Seite warnen Erdölgeologen eindringlich vor dem nahen Höhe- und Wendepunkt der globalen Erdölförderung⁴. Das Ärgerliche derartiger Beschwichtigungen und Warnungen in den Medien liegt darin, daß dem Leser nie verraten wird, wie man zu solchen Behauptungen kommt.

Wie kann man denn abschätzen, wieviel Erdöl ursprünglich in der Kruste der Erde vorhanden war und wieviel noch zu finden sein wird? Es gibt mehrere Methoden. Eine sei hier kurz vorgestellt.

Sie stammt von Marion King Hubbert, einem amerikanischen Erdölgeologen⁵. Seine Idee ist bestechend einfach: Die jährlich entdeckte Menge Erdöl sehr vieler Erdölfelder, eingetragen über der Zeitachse, liefert eine annähernd symmetrische Glockenkurve (s. Abb.). Wenn der Höhepunkt erreicht oder gar schon eindeutig überschritten ist (wie bei Punkt P in der Abb.), kann man die

Entdeckungskurve wegen ihrer Symmetrie in die Zukunft hinein ergänzen (grauer Teil der Glockenkurve). Die Fläche unter der Kurve liefert die ursprünglich vorhandene Menge Erdöl.

1956 versuchte Hubbert vorauszusagen, wann der Höhe- und Wendepunkt der Erdölproduktion auf dem Gebiet der USA eintreten würde (Landfläche der USA mit flachem Küstenschelf, aber ohne Alaska). Die Kurve der *Entdeckungen* lag damals am oder nahe am historischen Höhepunkt. Nun folgt die Kurve der *Produktion* ziemlich eng der Kurve der Entdeckungen, mit einer Verzögerung von knapp zwölf Jahren. Angenommen, der Höhepunkt der Entdeckungen liegt im Jahre 1957, dann ist der Höhepunkt der Produktion zwölf Jahre später, also 1969 zu erwarten, plus minus zwei Jahre wegen der angedeuteten Unsicherheit zum Zeitpunkt der Prognose (1956). Der historische Höhepunkt war nach Hubbert, zwischen 1967 und 1971 zu erwarten. Er trat 1970 ein. Nach 1970 stürzte die Produktion regelrecht ab. Der Absturz wurde 1974 aufgefangen, weil nun die 1968 entdeckte Riesenlagerstätte von 25 Milliarden Faß an der Nordküste Alaskas (Prudhoe-Bay) zu produzieren begann. Aber seit Mitte der 80er Jahre fiel auch dort die Produktion, während der Verbrauch ständig anstieg und noch immer steigt. Er erreichte im Jahr 2000 6,4 Milliarden Faß pro Jahr (knapp 890 Mio. t Rohöl). Die Weltmacht Num-

mer eins mußte schon damals 60 Prozent ihres Ölverbrauchs einführen. Nur knapp 2,6 Milliarden Faß wurden innerhalb der eigenen Grenzen produziert und diese Menge fällt unaufhaltsam. Dabei sind die USA noch immer drittgrößter Erdölproduzent hinter Saudi Arabien und Russland, gefolgt von Mexiko.

Die Fläche unter der Entdeckungskurve (s. Abb.), die King Hubbert 1956 aufgrund der Symmetriannahme ergänzte, ergab einen ursprünglichen Vorrat von rund 170 Milliarden Faß. Eine zweite, von der ersten unabhängige Methode von 1967 ging von 165 Milliarden Faß aus. Nimmt man die Riesenlagerstätte Alaskas hinzu und darüber hinaus auch die sogenannten Erdgaskondensate, erreicht der ursprüngliche Vorrat an Erdöl innerhalb der Grenzen der USA gut 200 Milliarden Faß.

Nun gibt es im kristallinen Sockel der Kontinente kein Erdöl, sondern nur in den Sedimentbecken, gefüllt mit Sedimentgesteinen (Tonschiefer, Sandsteine und Kalke). Geologisch läßt sich zeigen, daß die Sedimentbecken der Erde zusammen rund zehnmal größer sind als die Sedimentbecken der USA. Da die USA ein Land kontinentalen Ausmaßes sind und vermutlich weder überdurchschnittlich viel noch unterdurchschnittlich wenig Erdöl besitzen, bietet sich das Land als Maßstab an, den globalen ursprünglichen Vorrat zu bestimmen. Dieser muß rund zehnmal größer sein als der amerikanische, also gut 2000 Milliarden Faß. Nimmt man die Lagerstätten im Kontinentalabhang jenseits des flachen Küstenschelfs hinzu, sind es vielleicht sogar 2300 Milliarden Faß⁶. Schätzungen anderer Autoren mit anderen Methoden kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. Von der geschätzten ursprünglichen Menge waren am Ende der Jahrtausendwende weltweit 870 Milliarden Faß verbraucht, bleiben somit noch 1130 bis (höchstens) 1430 Milliarden Faß. Davon sind rund 1000 Milliarden Faß bereits entdeckt. Es bleiben noch 130 bis 430 Milliarden Faß zu finden.

Aus der Symmetrie der Produktionskurve folgt, daß zum Zeitpunkt, an dem die Produktion ihren Höhepunkt erreicht, rund die Hälfte des ursprünglichen Vorrats aufgebraucht sein wird. Von 2001 bis zu diesem Wendepunkt könnte die Welt somit noch 130 bis maximal 280 Milliarden Faß verbrauchen. Bei einem stagnierenden Verbrauch von 25 Milliarden Faß pro Jahr wäre der Wendepunkt zwischen 2005 und 2011 erreicht. Wegen des rasanten Wirtschaftswachstums in China könnte der globale Jahresverbrauch 2004 bereits 29 Milliarden Faß erreichen. Der Wendepunkt wäre dementsprechend früher anzusetzen.

Den bisherigen Überlegungen liegt die Annahme zugrunde, daß der Förderfaktor beim historischen Faktor 0,3 verharrt, d.h. nur 30 Prozent des tatsächlich vorhandenen Erdöls gefördert werden können und der Rest an den Porenwänden des Speichergesteins kleben bleibt. Angenommen, es gelänge, den Förderfaktor für das noch verbleibende Erdöl auf 40 Prozent anzuheben, wohlverstanden im globalen Durchschnitt und über alle Lagerstätten genommen, dann steige die Erdölmenge, die bis zum Wendepunkt verbraucht werden könnte, von 130 auf 173 bzw.

von 280 auf 373 Milliarden Faß. Bei einem unwahrscheinlichen Nullwachstum des Verbrauchs verschöbe sich der Wendepunkt von 2005 auf 2007 bzw. von 2011 auf 2015.

In der Internationalen Energie Agentur-Projektion fällt die Verbrauchsrate des Erdöls von knapp zwei Prozent auf 1,3 Prozent (s. Tab.). Der kumulierte Verbrauch erreicht Ende 2010 rund 280 und steigt bis Ende 2020 auf 615 Milliarden Faß. Das bedeutet: Der Wendepunkt wäre im besten Fall (bei einem Förderfaktor von generell 0,4 und mit dem Erdöl aus dem Kontinentalabhang) um 2013 zu erwarten. Danach entstünde eine Erdöllücke, die relativ leicht durch Kohle und/oder Erdgas aufgefüllt werden könnte. Sollte sich die aus dem Rahmen fallende Schätzung des Geological Survey der USA bewahrheiten, wonach die ursprünglich vorhandene Menge (konventionellen) Erdöls bei mindestens 2300, aber mit gleicher Wahrscheinlichkeit auch bei 4000 Milliarden Faß liege könne, würde der Wendepunkt etwa drei Jahre jenseits der Projektionsgrenze, also um 2033 erreicht. Eine Zunahme des globalen Ölverbrauchs von nicht einmal zwei Prozent pro Jahr ist wenig, verglichen mit den mehr als sieben Prozent in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts während der stürmischen Entwicklung der Industrieländer.

Gegen die obere Grenze von 4000 Milliarden Faß und für die untere Grenze von 2300 spricht folgende Beobachtung: Wenn der Erdölprix hoch liegt (was gegenwärtig der Fall ist), sucht man auch dort nach Öl, wo nur mit geringer Wahrscheinlichkeit etwas zu finden ist. Liegt der Ölpreis tief, wird nur an den aussichtsreichsten Stellen gebohrt. Trotz hoher Bohrtätigkeit stagniert die nachgewiesene Reserve, d.h. man findet pro Jahr nicht mehr, als was gerade verbraucht wird. Sie scheint sogar tendenziell zu sinken, zumal viele Schätzungen der Reserve zu hoch liegen dürften. Der drittgrößte Erdölmulti Shell mußte kürzlich seine ausgewiesenen Öl- und Gasreserven um nicht weniger als 20 Prozent nach unten korrigieren. Die norwegische Regierung sprach ebenfalls von fälligen Korrekturen nach unten. Sie werden nicht die einzigen bleiben.

Aber hat ExxonMobil vor zwei Jahren die Schätzung der global nachgewiesenen Ölreserven nicht mit einem Schlag von 140,1 auf 164,5 Milliarden Tonnen (auf rund 1200 Milliarden Faß) angehoben? Exxon hat dabei die fettesten Reserven der kanadischen Teersande als Ölreserve ausgegeben. Macht diese Methode Schule, könnte Deutschland seine Braunkohlelagerstätten ebenfalls als Ölreserve angeben. In beiden Fällen handelt es sich um feste (nicht flüssige) Energieträger. In beiden Fällen muß zuerst ein Deckengebirge abgetragen werden, um an die Teersande oder die Braunkohle zu kommen. Das danach geschürfte Material muß gereinigt werden, bevor es hydriert, d.h. mit Wasserstoff zur Reaktion gebracht wird. In beiden Fällen wird der Wasserstoff durch Wasserdampfreformierung mit Hilfe von Kohle oder Erdgas gewonnen. Das so entstandene synthetische Öl kann in herkömmlichen Raffinerien zu Treibstoffen verarbeitet werden wie natürliches Erdöl. Der einzige gewichtige Unterschied besteht darin, daß Teer weniger Wasserstoff benötigt

als Braunkohle. In beiden Fällen entstehen große Mengen Kohlendioxid, bevor auch nur ein einziger Liter Treibstoff in Motoren verbrannt wird.

Fazit: Die Projektion der Internationalen Energie Agentur kann so nicht realisiert werden, und sie darf auch nicht realisiert werden.

Temperaturzunahme und Erhaltung der Artenvielfalt

Im vergangenen Jahrhundert ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Erdatmosphäre von 295 um 70 auf 365 ppm (parts per million) gestiegen, zuletzt um fast zwei ppm pro Jahr. In der gleichen Zeit nahm die globale bodennahe Durchschnittstemperatur um 0,6 Grad Celsius zu. Ohne die Dämpfung durch Luftverschmutzung und Vulkanausbrüche waren es eher 0,7 Grad Celsius. Das ergibt einen Anstieg der Temperatur um 0,01 Grad Celsius pro ppm. 1990 wurden 3,8 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form von 13,9 Gigatonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre geblasen. Im gleichen Jahr stieg dessen Konzentration um 1,8 ppm. Das bedeutet 2,1 Gigatonnen Kohlenstoff oder 7,74 Gigatonnen Kohlendioxid pro ppm.

Wenn die Entwicklung gemäß der Projektion der Internationalen Energie Agentur verläuft, werden von 2001 bis 2030 rund 462 Gigatonnen Steinkohleeinheiten Primärenergie fossiler Herkunft verbraucht und im Verlauf dieser 30 Jahre 264 Gigatonnen Kohlenstoff (C) in Form von 968 Gigatonnen Kohlendioxid emittiert. Davon werden mindestens zwei Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in natürlichen Senken verschwinden (Ozean, junge noch wachsende Wälder); vielleicht sind es sogar vier Gigatonnen, was wir im folgenden optimistisch annehmen wollen. Andererseits geraten jedes Jahr Wälder in Brand und emittieren bis zu zwei Gigatonnen Kohlenstoff. Es gelangen somit von den 264 Gigatonnen Kohlenstoff im günstigsten Fall nur 204 Gigatonnen in die Atmosphäre. Wenn und soweit die Vergangenheit ein Leitfaden für die Zukunft sein kann, führt diese Emission zu einer Zunahme der Kohlendioxid-Konzentration um 97 auf 462 ppm und zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 0,97 oder um 0,03 Grad Celsius pro Jahr – dreimal schneller als im vergangenen Jahrhundert.

Ist das viel oder wenig? Wenn uns wirklich die Erhaltung der Artenvielfalt am Herzen liegt, ist diese Geschwindigkeit der Temperaturzunahme viel zu hoch. Dies lässt sich mit der Entwicklung der Korallenriffe belegen. Sie gehören mit den tropischen Regenwäldern zu den artenreichsten Lebensgemeinschaften. Korallen reagieren sehr empfindlich auf Temperaturerhöhungen des Wassers. Steigt die Temperatur dauerhaft um ein Grad Celsius, stirbt wahrscheinlich die Mehrzahl der Korallen ab. Das aber wäre das Ende des Riffs. Nun haben die Korallen im Verlauf der Evolution mehr als einmal Temperaturerhöhungen überstanden, wenn sie nicht zu schnell über sie hereinbrachen. Die Biologen gehen im günstigen Fall davon aus, daß sie eine Erhöhung um 0,1 Grad Celsius pro Dekade verkraften

könnten. Das bedeutet, daß bis 2030 die Zunahme der mittleren Temperatur der bodennahen Luft nicht wesentlich mehr als 0,3 Grad Celsius betragen sollte (ein Grad Celsius bis zum Ende dieses Jahrhunderts). Dem entspräche eine Zunahme der Kohlendioxid-Konzentration um 30 parts per million von 365 auf 395 parts per million, zu vergleichen mit den 395 ppm, die schon um 2010 zu erwarten wären, wenn die Entwicklung entsprechend der Projektion der Internationalen Energie Agentur verlief. Daraus ergibt sich, daß der Einsatz fossiler Energieträger massiv zurückgedrängt werden, wenn das „Korallenkriterium“ eingehalten werden soll.

Wenn die globale Durchschnittstemperatur der bodennahen Luft nur um 0,01 Grad Celsius pro Jahr steigen darf und die Kohlendioxid-Konzentration somit nur um ein ppm, dann dürfen nur zwei Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr emittiert werden. Sollten aber die natürlichen Senken jedes Jahr vier Gigatonnen Kohlenstoff absorbieren, sind weitere vier Gigatonnen erlaubt, die allerdings zu reduzieren sind um die Kohlenstoffdioxid-Mengen, die brennende Wälder erzeugen. Da wir annehmen wollen, daß die Menschen bis 2030 klüger geworden sind und ihre Wälder schonen, rechnen wir mit nur einer Gigatonne (statt mit zwei). Die „erlaubte“ Emission beträgt somit fünf Gigatonnen Kohlenstoff jedes Jahr oder 18,3 Gigatonnen Kohlendioxid. Zum Vergleich: Deutschland emittiert gegenwärtig pro Jahr etwa 0,85 Gigatonnen Kohlendioxid. Global dürften die Emissionen gegenwärtig 25 Gigatonnen überschreiten; das Kyoto-Protokoll möchte bis 2010 die Emission auf 20 Gigatonnen senken – ein stattlicher Erfolg, wenn es gelingen sollte.

Es gibt beliebig viele Mischungen der drei fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas, die zu einer Emission von fünf Gigatonnen Kohlenstoff führen. Der vielseitigste und darum begehrswerteste Energieträger, den es je gegeben hat, ist das Erdöl. Es läßt sich zerlegen in eine Unzahl von Produkten genau definierter Qualität. Die Produkte lassen sich transportieren und speichern in großen und kleinen drucklosen Behältern. Sie können für alle nur erdenklichen Zwecke eingesetzt werden: vom simplen Kocher über den Mähdrescher bis zur Gasturbine. Wir werden klugerweise eine Jahresverbrauchsmenge wählen, die bis zur Mitte des Jahrhunderts mit einiger Gewißheit zu keiner Öllücke führen wird, nämlich 3,4 Gigatonnen Erdöl (knapp 4,9 Gigatonnen Steinkohleeinheiten), was ungefähr dem heutigen globalen Verbrauch entspricht. Diese Menge wird im Jahr 2030 allerdings von 8,4 Milliarden Menschen beansprucht, nicht bloß von 6,1 Milliarden wie heute. Weil Erdöl der universalste und schon darum kostengünstigste Energieträger ist, sollten die ärmsten Länder möglichst lange uneingeschränkten und erschwinglichen Zutritt zu ihm haben, während die reichen Industrieländer dank ihres technischen Könnens längst Ersatz gefunden haben sollten. Die Gefahr besteht, daß diese für Erdöl jeden Preis zu zahlen bereit und auch imstande sein werden mit dem „Erfolg“, daß für die ärmsten Länder nichts mehr übrig bleibt. Das würde für diese so gut wie sicher das Ende ihrer Entwicklung bedeuten.

Die erlaubte Erdölmenge von 3,4 Gigatonnen wird man notgedrungen zu Treibstoffen und Motorenöl verarbeiten. Sollte der Kampf gegen die extreme Armut erfolgreich verlaufen und sollte der Verteilungsschlüssel für Treibstoff zwischen entwickelten Ländern und den sich entwickelnden Regionen darum bis 2030 bei einem Verhältnis eins zu eins angekommen sein (gegenwärtig 2,7 zu eins), käme man auf 1200 Liter „Benzinäquivalente“ pro Kopf in den Industrienationen und 240 Liter in den Entwicklungsländern. Bliebe alles Erdöl den Entwicklungsländern vorbehalten, kämen diese auf 480 Liter pro Kopf (die Industrieländer müßten in diesem Fall ihren Bedarf vollständig aus regenerativen Quellen decken). Diese Mengen sind zu vergleichen mit den gegenwärtigen Daten: rund 2500 Liter pro Kopf in den USA, gut 1000 in Deutschland, 354 Liter in Brasilien, 68 Liter in China, 54 Liter in Indien, gut 10 Liter in Tansania; diese Werte beziehen sich nur auf den Transportsektor.

Die Kohle ihrerseits sollte wenigstens 1,4 Gigatonnen Steinkohleeinheiten übernehmen, um nicht die ganze Last dem Erdgas aufzubürden und so dessen noch unbekannten Höhe- und Wendepunkt nicht möglichst rasch herbeizuzwingen. Die 1,4 Gigatonnen Steinkohleeinheiten Kohle (physisch etwa zwei Milliarden Tonnen Stein- und Braunkohle, je nach Mix) entsprechen knapp 45 Prozent des heutigen Kohleverbrauchs. Sie werden der Bereitstellung hochtemperierter Prozeßwärme für die Rohstoff- und Schwerindustrie dienen, was bei weitem nicht genügen dürfte. Weitere 1,8 Gigatonnen Steinkohleeinheiten müßte das Erdgas liefern. Die verbleibenden 1,3 Gigatonnen Steinkohleeinheiten Erdgas werden verstromt zur Bereitstellung von Grundlast, die unabhängig bleibt von wetterbedingten und jahreszeitlichen Schwankungen von Sonnenstrahlung und Windstärke. Man wird von Glück reden können, wenn die Nachfrage nach Strom sich bis 2030 nur verdoppelt: von 15 476 Terawattstunden (Internationale Energie Agentur-Projektion 2001) auf 31 000 Terawattstunden (oder 31 Billionen Kilowattstunden), wovon das Erdgas rund 4500 Terawattstunden übernehmen könnte, die Wasserkraft 4100 und die Atomenergie 2400 (s. Tab.).

Für das Erdgas bleiben 3,1 Gigatonnen Steinkohleeinheiten oder knapp 2,9 Billionen Kubikmeter, rund 20 Prozent mehr als heute verbraucht wird. Diese Mengen fossiler Energieträger von zusammen rund 9,4 Gigatonnen Steinkohleeinheiten werden fünf Gigatonnen Kohlenstoff (18,3 Gigatonnen Kohlendioxid) erzeugen: die Menge, die erlaubt ist, wenn wir uns an das „Korallenkriterium“ halten wollen. 9,4 Gigatonnen Steinkohleeinheiten fossiler Energie sind nur noch 48 Prozent der in der Internationalen Energie Agentur-Projektion für das Jahr 2030 vorgesehenen Menge. Der Einsatz fossiler Energie wäre somit erfolgreich zurückgedrängt, wenn denn eine derartig kräftige Reduktion gelänge. Wieso der Konjunktiv? Weil nun 52 Prozent des projizierten Energieverbrauchs oder rund zehn Gigatonnen Steinkohleeinheiten nicht-fossilen Energiequellen aufzubürden sind. Sie müssen 22 400 Terawattstunden Strom liefern (falls auf Atomenergie verzichtet wird) und den gesamten globalen Raumwärme- und Warmwasserbedarf decken. Das schafft Probleme, die leicht unterschätzt werden.

Was leisten nicht-fossile Energiequellen?

Die Projektion der Internationalen Energie Agentur traut der Atomenergie keine Kraftakte zu. Ihr relativer Anteil sinkt (s. Tab.). Die Atomenergie könnte einen gewichtigen und nachhaltigen Beitrag nur leisten, wenn die wirtschaftlich gewinnbaren Uranmengen durch Brütertechnik um das 60fache gestreckt und die thermische Effizienz der Atomreaktoren durch Reaktoren neuen Typs (z.B. Kugelhaufenreaktoren) verdoppelt würde. Ernsthaftes und ausdauernde Forschung an der Brütertechnik und am Kugelhaufenreaktor sind aber überall aufgegeben worden, vorwiegend, aber nicht nur, aus politischen Gründen.

Um die genannten zehn Gigatonnen Steinkohleeinheiten Primärenergie bereitzustellen zu können, kommen somit nur regenerative Energiequellen in Frage; die sogenannten kohlenstoff-neutralen: solche, die zwar Kohlendioxid emittieren, dieses aber zuvor der Atmosphäre entzogen haben (wie dies bei der Biomasse der Fall ist), und die sogenannten kohlenstoff-freien: solche, die kein Kohlendioxid emittieren wie die Windkraft oder die Sonnenenergie. Einige Möglichkeiten seien genannt, ohne auf Voraussetzungen und Annahmen der Schätzungen eingehen zu können⁷.

Rund 3,3 Gigatonnen Steinkohleeinheiten stehen aus kohlenstoff-neutralen Quellen in Form von Biomasse zur Verfügung (Holz und organische Abfälle aller Art, die zu den 2,35 Gigatonnen Steinkohleeinheiten altregenerativer Energie aus der Tabelle oben dazukommen). Ein Drittel davon könnte verflüssigt werden zu ca. 400 Litern Benzinäquivalente pro Kopf in den Industrieländern. Ein weiteres Drittel liefert in Blockheizkraftwerken 3500 Terawattstunden Strom und 0,7 Gigatonnen Steinkohleeinheiten Abwärme für Raumheizung und Warmwasser. Das letzte Drittel wird direkt verheizt vor allem in kalten, sonnenarmen Regionen. Es bleibt noch ein Bedarf von 1,3 Gigatonnen Steinkohleienheiten niedrigtemperierter Wärme.

Kohlenstoff-freie Quellen müssen demnach aufkommen für den restlichen Bedarf von 1,3 Gigatonnen Wärme und 18900 Terawattstunden Strom. Für die Bereitstellung der Wärme kommen die schon weit verbreiteten und bewährten Sonnenkollektoren in Frage, und für den Strom Solarzellen und Windturbinen.

Von den 1,3 Gigatonnen Steinkohleeinheiten Wärme werden 0,3 Gigatonnen abgezweigt für die Tropen, deren Bewohner ebenfalls Warmwasser und sogar Raumwärme benötigen, denn in hochgelegenen Orten kann es auch in den Tropen empfindlich kalt werden. Gut 5000 Quadratkilometer Kollektoren sollten genügen. Sie hätten vermutlich alle auf Dächern Platz, falls diese nicht schon durch Solarzellen besetzt sind. Für die gemäßigten Zonen muß eine Gigatonne Steinkohle-einheiten (8,14 Billionen Kilowattstunden) Wärme genügen. Um sie zu sammeln, sind mindestens 22000 Quadratkilometer Kollektoren nötig, dazu Langzeitspeicher von weit mehr als 100 Kubikkilometer (!) Volumen. Die Dachfläche genügt

bei weitem nicht und auch nicht das Brachland, das dringend für Biomasse benötigt wird. Der Bedarf an Kollektorfläche ließe sich allerdings halbieren, wenn alle Gebäude mit einer hochwirksamen und teuren Wärmedämmung versehen würden.

Von den 18900 Terawattstunden Strom sollen dem Wind 7100 Terawattstunden abgewonnen werden. Er soll Windräder antreiben, deren Rotordurchmesser 100 Meter erreicht und deren Nabenhöhe 80 Meter in den Himmel ragen. Ihre Nennleistung liegt bei 3 Megawatt (3000 Kilowatt). Zu bedenken ist, daß selbst auf dem offenen Meer der Wind nie während der 8760 Stunden des Jahres bläst, und auch nicht ständig mit einer Geschwindigkeit zwischen 45 und 90 Kilometer pro Stunde, dem Windband, in dem die Turbinen bei Nennleistung arbeiten. Dementsprechend müßten 700 000 bis 800 000 Windräder aufgestellt werden. Wer gegen diese „Verspargelung“ von Tausenden von Kilometern Küste ist, muß sagen, wie er 7100 Terawattstunden Strom pro Jahr produzieren oder auf welche Energiedienste er eventuell verzichten will.

Es bleiben noch 11 800 Terawattstunden für die Solarzellen. Stehen nur die weitverbreiteten Siliziumzellen mit einer Spitzenleistung von 100 Watt pro Quadratmeter zur Verfügung, werden Solaranlagen mit einer Gesamtfläche von 118 000 Quadratkilometer benötigt. Würden alle Anlagen im Wüstengürtel der Erde errichtet, käme man mit der Hälfte der Flächen aus, es müßten aber lange Fernleitungen zu den Verbrauchszentren gebaut werden. Verfügte man heute schon über Solarzellen mit einer Spitzenleistung von 200 Watt (auf die wir vermutlich noch lange warten müssen), käme man mit knapp 30 000 Quadratkilometer aus. Rechnet man die Anlagen und Wege für den Unterhalt dazu, dürfte die beanspruchte Fläche 50 000 Quadratkilometer übersteigen.

Welcher Aufwand müßte getrieben werden, wenn die Industrieländer die oben vorgesehenen 400 Liter Benzinäquivalente pro Kopf und Jahr aus Biomasse aufstocken wollten mit 600 Liter in Form von solarem Wasserstoff? Eine Überschlagsrechnung ergibt, daß man mit Solarzellen von 200 Watt pro Quadratmeter Nennleistung (statt 100 Watt) und bei einem Wirkungsgrad der Elektrolyse von 0,9 (statt nur 0,7 wie heute) für die 1,4 Milliarden Bewohner der Industrieländer um 2030 im Sonnengürtel der Erde 22 000 Quadratkilometer Solarzellen aufstellen müßte. Damit lassen sich rund 240 Millionen Tonnen oder 2,7 Billionen Kubikmeter Wasserstoff gewinnen. Das dazu nötige Wasser von 2,16 Milliarden Kubikmeter ist im Sonnengürtel natürlich nirgends zu finden, schon gar nicht angesichts des zu erwartenden globalen Wassermangels. Der Sonnenstrom müßte an das Meer geleitet werden, um dort aus Meerwasser elektrolytisch Wasserstoff zu gewinnen. An der Sauerstoffelektrode entstünden dann aber auch beträchtliche Mengen Chlor, die abgetrennt und entsorgt werden müßten.

Geoengineering

An dieser Stelle kommt eine neue Disziplin ins Spiel: das Geoengineering. Statt Wasserstoff solar produzieren zu wollen, wird er klassisch mit bewährten Methoden aus Koks und Wasserdampf erzeugt (die chemische Industrie erzeugt heute mit dieser Methode jährlich etwa 50 Millionen Tonnen Wasserstoff, benutzt aber meistens Erdgas statt Kohle). Theoretisch und im Idealfall erhielte man aus 720 Millionen Tonnen Koks und 2162 Millionen Kubikmeter Wasser rund 240 Millionen Tonnen Wasserstoff (2,7 Billionen Kubikmeter), allerdings auch 2,64 Milliarden Tonnen Kohlendioxid, und dies jedes Jahr. Dieses Kohlendioxid lässt sich vom Wasserstoff abtrennen (leichter als z.B. aus Rauchgasen von Kohlekraftwerken und Fernheizkesseln). Es wird verflüssigt und in die Tiefsee geleitet oder in poröse Steinsformationen gepresst in der Hoffnung, daß es auch dort bleibt. Man hofft, daß dieses Vorgehen sich als ökologisch vertretbar erweisen wird.

Werden all diese schwindelerregenden Zahlen nicht substantiell reduziert, wenn man auch die altbekannte Wasserkraft und die Geowärme berücksichtigt, nicht zu reden von Gezeitenhub und dem Wellengang der Ozeane? Die Wasserkraft liefert 2,2 Prozent der Primärenergie von 2001 (s. Tab.). Dieser Anteil kann bis 2030 nur mit Mühe gehalten werden. Der mögliche Beitrag der übrigen Quellen liegt deutlich unter dem des Wassers. Geowärme wird, wie die Biomasse, meist überschätzt. Von vulkanischen Regionen abgesehen ist die Gefahr groß, daß man einen Vorrat von Geowärme abbaut, statt nur einen sich regenerierenden Zufluß aus dem Innern zu nutzen. Kein Wunder, wenn man bedenkt, daß der durchschnittliche Wärmefluß aus dem Erdinnern an der Erdoberfläche es nur auf 63 Milliwatt pro Quadratmeter bringt, während die Sonne an der Erdoberfläche im globalen Durchschnitt 170 Watt schafft.

Alle diese Zahlen sollen die Größenordnung illustrieren, mit denen gerechnet werden muß, wenn man wirklich die fossile Energie zurückdrängen, am Korallenkriterium festhalten und bei den bisherigen Ansprüchen bleiben will. Eine rein technische Lösung des Programms weg von fossilen Energieträgern und hin zu regenerativer Energie mag bis 2030 oder 2050 möglich sein, die wirtschaftliche Realisierbarkeit bleibt fraglich, und von den ökologischen Problemen war hier noch gar nicht die Rede. Man denke an die riesenhaften Monokulturen von Fichten, Eukalyptus, Raps, Zuckerrohr usw. (ein Fest für Schädlinge aller Art), an die ein oder zwei Gigatonnen organischer Substanz, die dem Acker entzogen werden und nun der Humusbildung fehlen, oder an Tausende von Quadratkilometern im Trockengürtel der Erde, dessen helle Oberfläche stellenweise auf einmal dunkelblau erscheint wie das Meer. Wird die Effizienzrevolution tatsächlich einen Weg aus diesem Problemknäuel weisen, wie seit Jahrzehnten propagiert wird?

Die Effizienzrevolution

„Faktor Vier!“: Doppelter Wohlstand bei halbem Rohstoffverbrauch, so lautet die vermeintliche Botschaft⁸. Es soll möglich sein, unsere Mobilität und die tausend Formen der Annehmlichkeiten und Entlastungen, die moderne Technik gewährt, beizubehalten mit einem Viertel des Wassers, einem Viertel der Stroms, einem Viertel des Bodens, kurz mit einem Viertel dessen, was wir bisher aufgewandt haben.

Die Effizienzrevolution ist zweifellos zentral. Wir müssen den Wirkungsgrad der Umwandlung von Primärenergie in Sekundärenergie (in Strom, Brenn- und Treibstoff) und den Wirkungsgrad der Gewinnung von energetischen Dienstleistungen (wie Wärme, motorische Kraft, Licht und Informationsverarbeitung) aus Sekundärenergie verdoppeln und verdreifachen. Die Effizienzrevolution läuft nun schon seit 30 Jahren seit den Erdölkrisen von 1973 und 1979 und hat unzählige Erfolge vorzuweisen. Beispielsweise hat sich der Stromverbrauch von Kühlschränken und Waschmaschinen inzwischen halbiert. Ob er sich allerdings noch einmal halbiert, ist fraglich.

Der Gesamtwirkungsgrad, das Verhältnis von Energie-Dienstleistungen (auch Nutzenergie genannt) zur Primärenergie wird für die Zeit um 1900 auf zwölf Prozent geschätzt. Er erreichte anfangs der 70er Jahre gut 30 Prozent und ist seither kaum mehr gestiegen. Das ist alarmierend. Woher diese Stagnation? Es gibt viele Gründe:

1. Die ersten Schritte möglicher Effizienzverbesserung waren groß, leicht und billig zu haben (z.B. der Ersatz von Glühbirnen durch Fluoreszenzröhren). Die letzten der möglichen Schritte werden klein sein, technisch aufwendig und darum teuer.
2. Ein wachsender Anteil der Primärenergie wird verstromt bei einem kollektiven Wirkungsgrad des thermischen Kraftwerksparks von weniger als 40 Prozent, auch wenn es Anlagen gibt, die bei optimaler Betriebsführung 60 Prozent erreichen (kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke) oder gar 80 Prozent, wenn die Abwärme von Kraftwerken als Fernwärme eingesetzt wird. Fehlen aber im Sommer die Abnehmer für die Fernwärme, halbiert sich der Effizienzgrad der Anlage. Es wird zudem nie möglich sein, alle Anlagen jederzeit optimal zu betreiben, schon weil aus Gründen der Regulierung einige gedrosselt laufen müssen.

3. Ebenfalls ein wachsender Anteil der Primärenergie wird für den Verkehr eingesetzt. Der Verkehr hat das schlechteste Verhältnis von Nutzenergie zu Sekundärenergie aller Anwendungssektoren (unter 20 Prozent gegenüber fast 60 Prozent der Industrie). Zudem verlangt er Treibstoffe immer höherer Qualität (hohe Oktanzahl, möglichst ohne Benzol und Schwefel). Das verlangt von den Raffinerien immer mehr Verarbeitungsschritte mit entsprechend steigendem Energieaufwand, der in der Gesamtbilanz als Verlust auftritt.

4. Ein großer Teil des Effizienzgewinns wird durch höhere Komfort- und Sicherheitsansprüche der Konsumenten wieder aufgezehrt. Trotz der in den letzten 20 Jahren erreichten Effizienzverbesserungen von Verbrennungsmotoren ist es nicht gelungen, den Benzinverbrauch unter acht Liter pro 100 Kilometer zu drücken.

5. Schließlich gibt es Millionen von Motoren und Geräten, die in Erwartung eines Produktionsbefehls im Leerlauf laufen, also ohne ihre eigentümliche Dienstleistung zu liefern, dabei aber Energie verbrauchen, die im Einzelfall gering sein mag, kollektiv aber die Leistung ganzer Kraftwerke erfordert, die man sich leicht ersparen kann. Wenn 100 Millionen Fernseher, Videorecorder, Computer, Faxgeräte, Kaffeemaschinen usw. im Bereitschaftsmodus laufen mit einer mittleren Leistungsaufnahme von nur 20 Watt, werden 2000 Megawatt aus dem Netz gesogen: die Nettoleistung zweier Atomkraftwerke der Maxiklasse.

Ob die Effizienzrevolution *allein* die Lösung des Problems ist, bleibt also fraglich.

Die Suffizienzrevolution

Das Fremdwort „Suffizienz“ wurde vermutlich gewählt, weil es ähnlich wie „Effizienz“ klingt, und weil nicht sofort offensichtlich wird, was eigentlich gemeint ist, nämlich Einschränkung und Verzicht vor allem seitens derjenigen, die auf der Wohlstandsskala oben sind. Dann bräuchte man viele tausend Quadratkilometer Solarzellen und Sonnenkollektoren, Tausende von Windmühlen und viele tausend Tonnen Biomasse weniger als oben ausgeführt, und es gäbe trotzdem noch die Chance für jene, die auf der Wohlstandsskala ganz unten sind, in die Nähe der Mitte aufzusteigen.

Was gerade vorgeschlagen wurde und für viele Zeitgenossen eigentlich ganz vernünftig und zumutbar klingt, ist für viele Fachleute aus zwei Gründen das perfekte Katastrophenszenario. Zum ersten: Eine wettbewerbsgetriebene Marktwirtschaft muß, strukturell bedingt, ständig wachsen, oder sie schrumpft. Zudem wächst sie, weil wir seit Jahrzehnten über unsere Verhältnisse leben, wie die Schuldenberge aller Staaten und der Zustand des blauen Planeten zeigen. Die Wirtschaftswissenschaftler werden sich anstrengen müssen, herauszufinden, wie eine Wirtschaft stationär (nicht wachsend) und dennoch stabil (nicht schrumpfend) sein kann, und das, ohne die unbestrittenen Vorteile von Wettbewerb und Markt samt und sonders zu verlieren.

Und zum zweiten: Appelle an die Pflicht (z.B. Ansprüche zu begrenzen) helfen auf die Dauer nicht. Wir benötigen soziale Mechanismen von der Art der „unsichtbaren Hand“ des Adam Smith, die uns dazu bringen, das Gesollte zu tun, ohne daß wir es merken oder explizit wollen müssen. Man sucht nach entsprechenden Rahmenbedingungen für die Wirtschaft, nach Anreizen: prompte Belohnung für sy-

stemkonformes Verhalten und ebenso prompte Sanktionen im gegenteiligen Fall für Produzenten wie Konsumenten. Ohne soziale Mechanismen wird es nicht gehen, aber ohne Moral auch nicht. Mindestens gelegentlich müssen wir moralisch – selbstbestimmt – handeln und nicht nur überlistet von Mechanismen: zum Beispiel dann, wenn Parlamentarier die genannten Rahmenbedingungen und Gesetze beschließen und dabei Ziele, Mittel und die List dahinter offenlegen müssen, oder wenn die Bürger spätestens vier Jahre danach die Regierung wiederwählen sollen, die das Schmerzhafte beschloß und durchführte.

Ein „sozialer“ Mechanismus wird mit Sicherheit wirksam werden: Die Energie wird nie mehr billig sein. In den Wäldern Mitteleuropas verrotten große Mengen Holz, das niemand als Energierohstoff einsammelt, denn das wäre ein reines Verlustgeschäft angesichts der bestehenden Energiepreise. In Zukunft werden wir aus ein oder zwei Millionen Quadratkilometern fast die gesamte Nettoproduktion der Wälder einsammeln müssen, und das nicht gegen Hungerlöhne. Die Brenn- und Treibstoffe, die daraus erzeugt werden, können deshalb nicht billig sein. Ist die Energie teuer, wird sie darüber hinaus aus dem Teuerungsindex herausgenommen, um zu verhüten, daß bei der nächsten Lohnverhandlung die Teuerung abgegolten und die Energie real doch wieder so billig wird wie zuvor; so werden die Bürger wie von selbst („mechanisch“) zum Sparen „verleitet“, im Sinn der Effizienz wie der Suffizienz.

Wenn es darüber hinaus wahr sein sollte, daß die Energie nicht nur ein Kosten-, sondern auch ein Produktionsfaktor ist, der für die Wertschöpfung ebenso viel Gewicht hat wie die beiden anderen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit zusammengekommen, und wenn es richtig ist, die Produktionsfaktoren nach ihrer Leistungsfähigkeit zu besteuern, dann muß die Energie stärker besteuert werden als die Arbeit⁹. Dann wird die Energie noch einmal teurer, ihr Druck in Richtung von Effizienz und Suffizienz noch stärker. Aber gleichzeitig wird die (Routine-) Arbeit entlastet und die Arbeit eliminierende, dafür aber Strom fressende Automatisierung von (fast) allem und jedem in Schranken gewiesen. Arbeiten, die heute nur schwarz oder zu Hungerlöhnen durchführbar sind, werden wirtschaftlich (z.B. Nutzholz sammeln aus tausenden von Quadratkilometern Wald).

Wie so oft, ist der Weg dorthin anstrengend und risikoreich, nicht nur für jene, die in der gesellschaftlichen Pyramide unten stehen. Mit abnehmender (nicht verschwindender) Automatisierung sinkt allerdings auch die hohe Produktivität vieler Arbeitsplätze. Bisher hohe Löhne schrumpfen oder verlieren an realer Kaufkraft. Aber einmal am gesteckten Ziel angekommen, werden (fast) alle aufatmen. Wie konnten wir uns derart von Wettbewerb und Markt hetzen lassen! Gewiß, wir werden etwas weniger reich sein. Wir werden uns selber röhren, selber unterhalten müssen (im doppelten Sinn des Wortes), zumindest mehr als bisher. Dafür werden der Naturverbrauch und die Naturzerstörung geringer sein, was wir doch wollen sollen, zumal jene jenseits des Nord-Süd-Grabens mehr an Natur nutzen und auch

verbrauchen müssen, dies aber auch zugleich dank des technischen Fortschritts mit weniger Naturzerstörung tun können als bisher.

ANMERKUNGEN

¹ Vgl. www.iea.org. Diese Organisation wurde 1974 in Paris gegründet mit dem Ziel, die Regierungen in Energiefragen zu beraten.

² Primärenergie: noch nicht für den Handel aufbereite Rohform der Energie, wie sie von der Natur geliefert wird.

³ Sekundärenergie: für den Handel aufbereitete Rohenergie wie Strom, Treib- und Brennstoffe.

⁴ Z. B. C. J. Campbell u. a., Ölwechsel! Das Ende des Erdölzeitalters u. die Weichenstellung für die Zukunft, hg. v. Global Challenges Network (München 2002).

⁵ M. King Hubbert hat noch eine zweite Methode entwickelt, die praktisch zum gleichen Ergebnis führte: vgl. P. Erbrich, Grenzen des Wachstums im Widerstreit der Meinungen. Leitlinien für eine nachhaltige ökologische, soziale u. ökonomische Entwicklung (Stuttgart 2004) 142f.

⁶ Ein Moment der Unsicherheit liegt darin, daß der Erdölgehalt der verschiedenen Sedimentbecken ganz unterschiedlich ist. Es gibt zwei Sonderregionen, die zusammen wahrscheinlich mehr als 80 Prozent allen Erdöls enthalten. Die eine zieht sich von Westsibirien über das Kaspische Meer zum Persischen Golf, die andere von der Tiefebene und dem Delta des Mississippi zum Delta des Orinoco (Venezuela).

⁷ Für Einzelheiten vgl. Erbrich (A. 5).

⁸ E. U. von Weizsäcker u. a., Faktor Vier, doppelter Wohlstand – halbierter Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome (München 1995).

⁹ Vgl. R. Kümmel, Energie, Wirtschaftswachstum u. technischer Fortschritt, in: Physikalische Blätter 53 (1997) 869–875.