# 10 Schritte zu einer nachhaltigen Energiezukunft

von Dr. Rudolf Rechsteiner, Basel,
Abgeordneter des schweizerischen Nationalrats [1]
rechsteiner@rechsteiner-basel.ch

(Dieser Text erscheint in „Das Solarzeitalter“ Dezember 2004)

## Einführung

Als Ökonom mit Fokus auf Energie und Umwelt möchte ich im Folgenden Entwicklungen und Indikatoren beschreiben, die die zukünftige Energieversorgung und die Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Energienutzung in den nächsten Jahren beeinflussen. Nachhaltigkeit wird dabei nicht nur als ökologische Qualität, sondern als solide ökonomische Strategie verstanden, denn nach Ansicht des Autors sind die Industrie- wie die Entwicklungsländer im Energiesektor mit ausserordentlichen Herausforderungen konfrontiert. Der nachfolgende Beitrag beschreibt den Weg zur Vollversorgung mit erneuerbaren Energien. Weiter wird die Rolle von Wasserstoff, Öl, Erdgas, Kohle und Atomenergie kritisch reflektiert, weil es sich um bevorzugte Strategien internationaler Konzerne, der grossen Stromversorger und mancher internationaler Organisationen im Bereich Energie handelt.

## 1. Die Erschöpfung von Erdöl und Erdgas

Vor knapp 250 Jahren begann die Industrielle Revolution mit der Einführung fossil betriebener Maschinen. Erdöl, Gas und Kohle prägen noch heute massgeblich die modernen Industriegesellschaften, in denen wir leben. Innert 150 Jahren ist Erdöl zum meist gehandelten Gut der Welt geworden, und zu einer der hauptsächlichen Ursachen von gewalttätigen Konflikten. Mit der Ernennung der Erdöl-Geschäftsmanns George W. Bush zum US-Präsidenten scheint die Erdölwirtschaft einen historischen Höhepunkt erreicht zu haben – ein Höhepunkt, von dem aus der Niedergang unausweichlich erscheint. Das Ende des Ölzeitalters hat bereits begonnen.

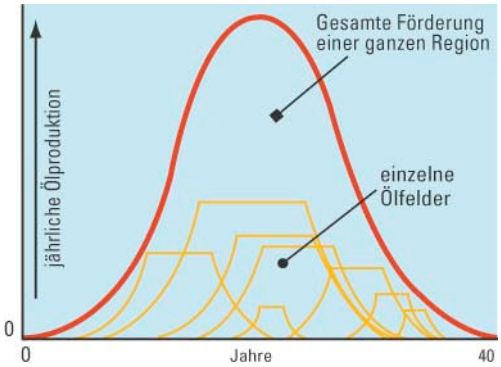


**Abbildung 1: Hubbert-Kurve [2]**

Über die Verfügbarkeit von Erdöl im Boden und seine praktische Förderung wurden in der Vergangenheit verschiedene Theorien entwickelt. Die erfolgreichste stammt vom US-amerikanischen Ölgeologen Marion King Hubbert, der im Jahre 1956 prognostizierte, dass die Ölförderung der USA im Jahre 1970 ihren Höhepunkt erreichen und danach rückläufig verlaufen werde. Die „Hubbert-Kurve“ (Abbildung oben) folgt empirischen Beobachtungen, basierend auf Geologie und Statistik: die praktische Verfügbarkeit von Erdöl in einer Region folgt im Zeitablauf einer Glocken-Kurve, ähnlich der Gauss’schen Normalverteilung. Grosse Felder werden zuerst entdeckt, kleinere später. Auf die Entdeckung von Erdöl und dem Wachstum der Produktion folgt ein „Plateau“ der Öl-Förderung; danach nimmt die Förderung ab und schliesslich sinkt schliesslich gegen Null.

In den fünfziger Jahren äusserte Hubbert die Erwartung, dass die globale Ölförderung um die Jahrhundertwende ihren Höhepunkt überschreiten werde. Die restriktive Förderpolitik der OPEC-Länder während den 70er- und frühen 80er-Jahren dürfte zu einer zeitlichen Verschiebung des Fördermaximums um einige Jahre führen.

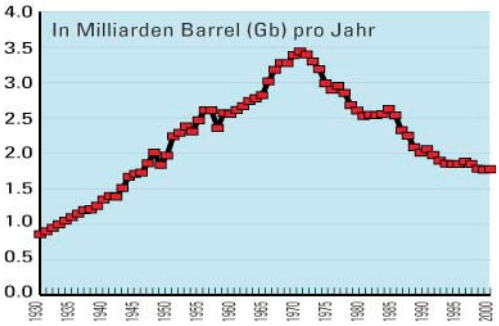


**Abbildung 2: US-Ölförderung (ohne Alaska und Hawaii)[3]**

Hubbert wurde bei Publikation seiner Theorien von den US-Behörden und der Ölindustrie gleichermassen als unseriös denunziert. Doch seine Theorien bestätigten sich exakt. Ab dem Jahre 1971 begann die US-Ölförderung zu sinken und folgte diesem Abwärtstrend stetig. Die Abnahme der Förderung wurde in jüngster Zeit etwas verlangsamt, weil Ölvorkommen im Golf von Mexiko, insbesondere in grösserer Meerestiefe, entdeckt und gefördert werden

konnte. Doch auch in diesen neuen Förderzonen folgt die Produktion einer Hubbert-Kurve und wird nach dem Maximum um das Jahr 2010 absinken.

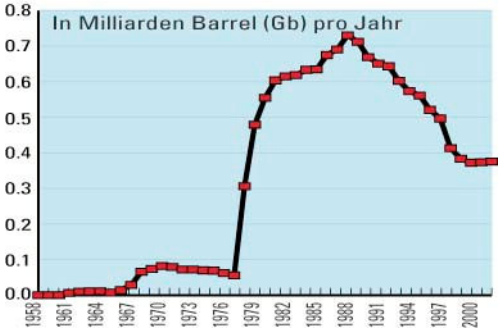


**Abbildung 3: Ölförderung in Alaska [4]**

Hubberts Prognosemethoden haben den Langzeit-Test bestanden. Neue Explorations- und Produktionstechnologien können den Verlauf der Hubbert-Kurve zwar leicht beeinflussen, aber nicht grundlegend ausser Kraft setzen. Die Grenzen der Öl-Förderung sind durch die geologischen Verhältnisse vorgegeben. Alaskas gigantische Ölfelder wurden hauptsächlich nach dem Ölschock von 1973 erschlossen. Die Produktion begann ab 1978 steil anzusteigen. Sie erreichte ihren Höhepunkt innert 10 Jahren, gefolgt von einer im Wesentlichen symmetrischen Abnahme der Produktion.

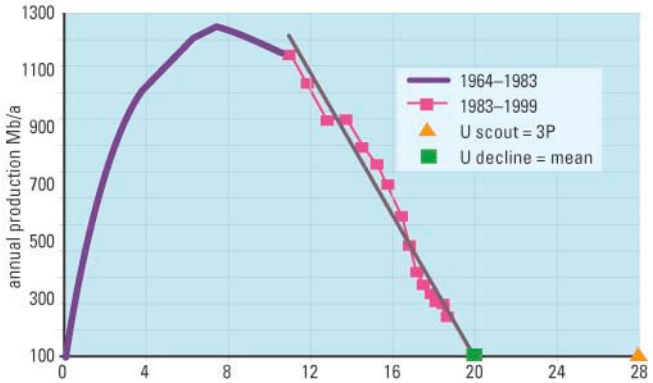


**Abbildung 4: Samotlor: Verlauf der Jahresproduktion [5]**

Samotlor ist Russlands grösstes Ölfeld. Die Ölförderung geht stetig zurück, trotz Einsatz von sekundären und tertiären Produktionstechnologien.

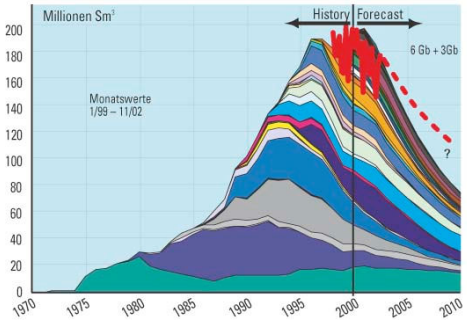


**Abbildung 5: Ölförderung von Norwegen [6]**

Die glockenförmige Produktionskurve lässt sich sowohl für grössere Ölfelder als auch für ganze Regionen beobachten. In Norwegen präsentiert sich ein ähnliches Bild wie in Alaska. Die Produktionsverläufe individueller Ölfelder sind in diesem Bild speziell gut dargestellt. Jedes Ölfeld beschreibt seine eigene Hubbert-Kurve und endet in einer stetigen Abnahme der Förderung.

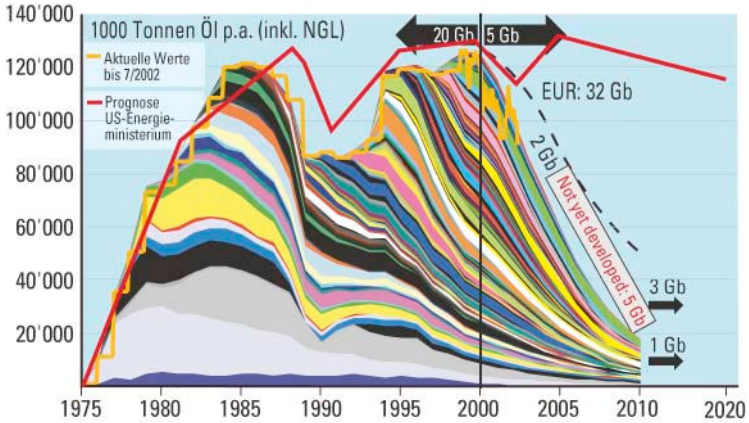


**Abbildung 6 Grossbritannien [7]**

In Grossbritannien brach die Ölförderung kurzfristig ein (abgebildet durch die Delle in der Mitte des Bildes), verursacht durch den Brand der Ölplattform Piper-Alpha. Abgesehen von diesem unfallbedingten Unterbruch bestätigt sich auch hier die Hubbert-Kurve, mit einem Höhepunkt der jährlichen Förderung im Jahre 1999 von 2,65 Mio. Barrel pro Tag. Seither ist die durchschnittliche Tagesproduktion schon um 23 % zurück gegangen (6 % pro Jahr), auf 2,073 Mio. Barrel pro Tag im Jahre 2003. Im Februar 2004 lag die Produktion nur noch bei 1,867 Mio. Barrel pro Tag – eine Reduktion um volle 30 % seit dem „Peak“ im Jahre 1999. [8]

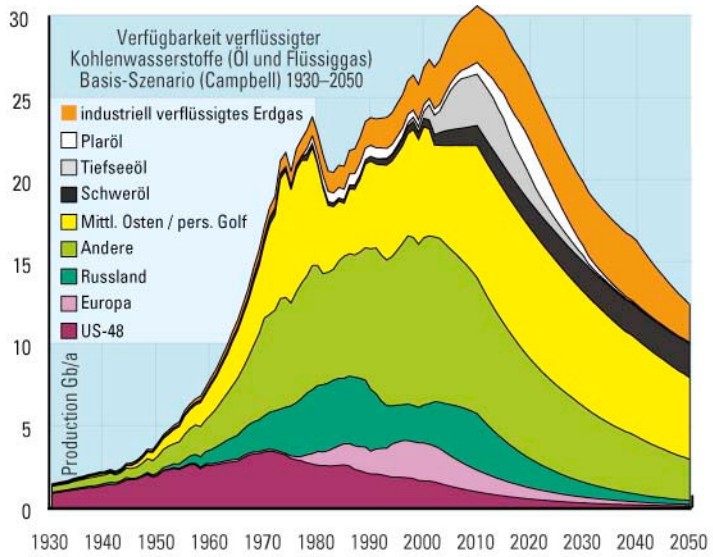


Abbildung 7: Verfügbarkeit von flüssigen Kohlenwasserstoffen, Prognose von ASPO [9]

ASPO, die *Association for the Study of the Peak of Oil and Gas* ist eine Vereinigung kritischer Ölgeologen, die sich mit den Fragestellungen und Prognosen der zukünftigen und bisherigen Ölförderung befasst. ASPO rechnet damit, dass sich die Produktion flüssiger oder verflüssigter fossiler Energieträger noch ungefähr bis zum Jahre 2010 steigern lässt. Danach wird die Förderung von neuen Feldern nicht mehr ausreichen, die Rückgänge von alten Feldern zu kompensieren, geschweige denn, weiteres Wachstum zur Gesamtproduktion beizutragen. [10]

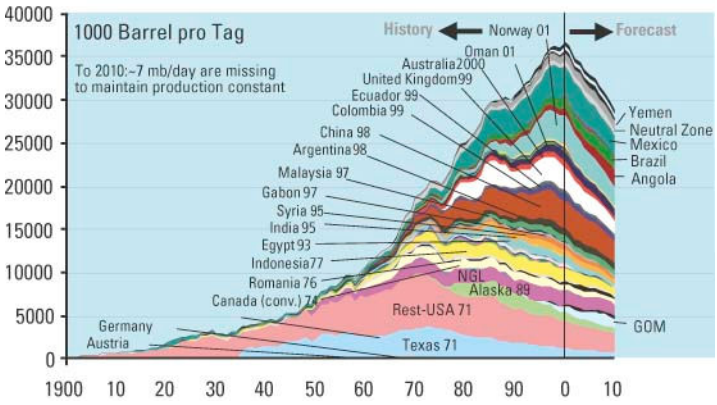


**Abbildung 8 Post-Peak-Nationen [11]**

In immer mehr Ländern hat die Ölförderung ihr Maximum, den „Peak“, überschritten und geht gegenüber dem Vorjahr zurück (so genannte *post-peak-nations*). Neue Ölbohrungen helfen nicht mehr. Die Produktion ist vorab in den meisten OECD-Ländern rückläufig und die Abhängigkeit von den Öl-Exporten der OPEC-Länder [12] wird immer grösser. Doch auch manche OPEC-Mitglieder sind *post-peak*: Indonesien und Venezuela, um nur zwei Beispiele zu nennen, sind nicht mehr in der Lage, die ihnen zustehenden OPEC-Quoten voll auszuschöpfen; Indonesien dürfte seit Mitte 2004 sogar Netto-Importeur geworden sein.

## 2. Steigende Energiepreise

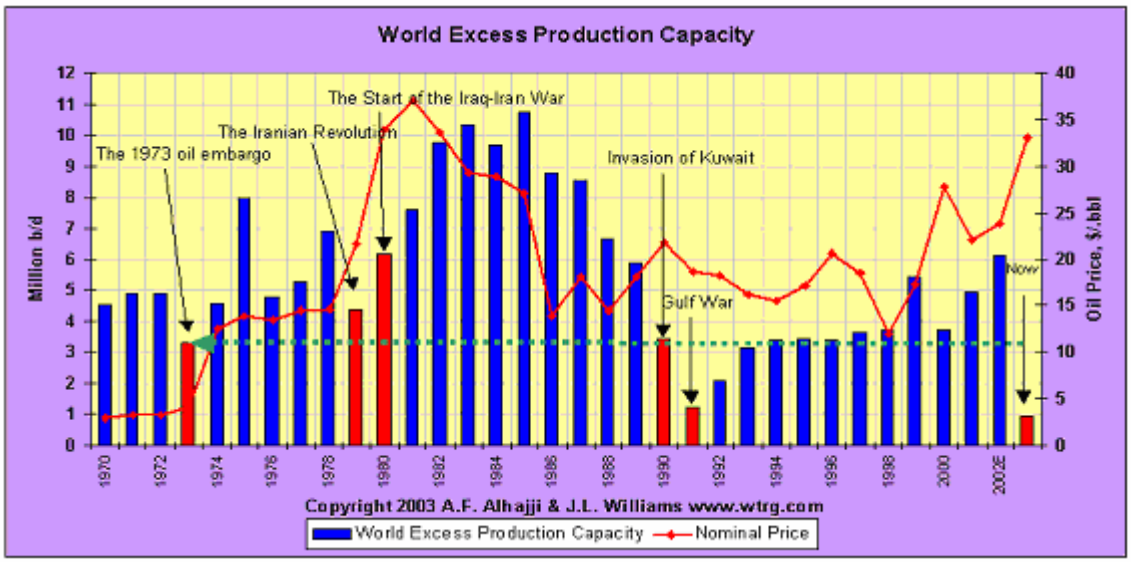


**Abbildung 9: Globale Reservekapazitäten zur Steigerung der Tagesproduktion und Verlauf der Erdölpreise [13]**

Die Anstrengungen mancher Geologen, das genaue Datum des globalen „Peaks" herauszufinden, sind akademisch interessant. Aber die Frage ist angesichts der erodierenden Preisstabilität auf den Ölmärkten zweitrangig geworden. Preisstabilität ist nur zu erwarten, wenn es genügend Reservekapazitäten zur Steigerung der Tagesproduktion gäbe, die innert nützlicher Frist (zB. 90 Tage) auf den Markt gebracht werden könnten. Dies ist seit längerem nicht mehr der Fall. Der Ölmarkt ist in Aufruhr. Die globale Reservekapazität sank mit dem Beginn der Irak-Invasion im Jahre 2003 ab und lag anfangs 2004 höchstens bei rund 2 Mio. Barrel pro Tag (bei einer Tagesförderung von über 80 Mio. Barrel). Die Reserven verkleinerten sich im Sommer 2004 weiter, bedingt durch die steigende Ölnachfrage aus China und Indien und liegen heute wahrscheinlich auf dem niedrigsten Stand seit dem 2. Weltkrieg.

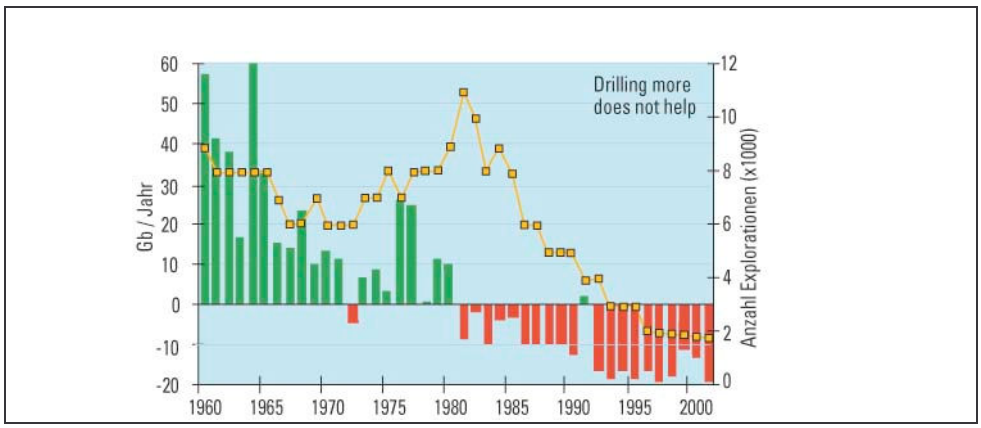


**Abbildung 10 Verlauf der Anzahl Explorationen (gelbe Linie, rechte Skala) und jährlicher Nettozuwachs der Öl-Reserven (linke Skala, Gb= Gigabarrel, dtsch. Mrd. Barrel) [14]**

Öl wird es zweifellos noch weitere 75 – 100 Jahre auf dem Weltmarkt geben – aber in stetig sinkenden Quantitäten. Die Versorgungslage hat sich fundamental verändert, denn die Preiselastizität – insbesondere die Reaktion der Anbieter auf höhere Preise – spielt nicht wie in anderen Industrien. Hohe Ölpreise führen heute nicht mehr zu einer raschen, signifikanten Zunahme der Ölproduktion. Schon in den frühen 70er-Jahren war klar geworden, dass hohe Preise (zwischen 80 und 100 $ pro Barrel real, zu heutigen Preisen) zwar die Zahl der Ölbohrungen zu steigern vermögen, dass dies aber nicht zu neuen, grösseren Entdeckungen führt. Seit 1981 übersteigt der Konsum die Zunahme der neu gefundenen technischen Reserven: die geologische Verfügbarkeit von Erdöl ist rückläufig, und die Industrieländer können sich weder militärisch noch technisch aus der sich abzeichnenden Versorgungskrise befreien.

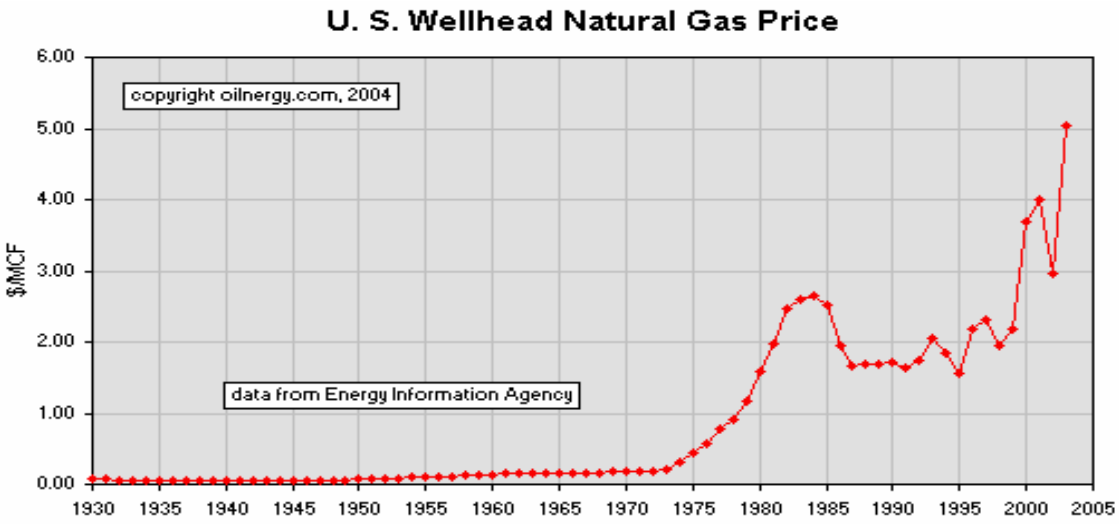


Abbildung 11: US Erdgaspreise 1930-2004 [15]

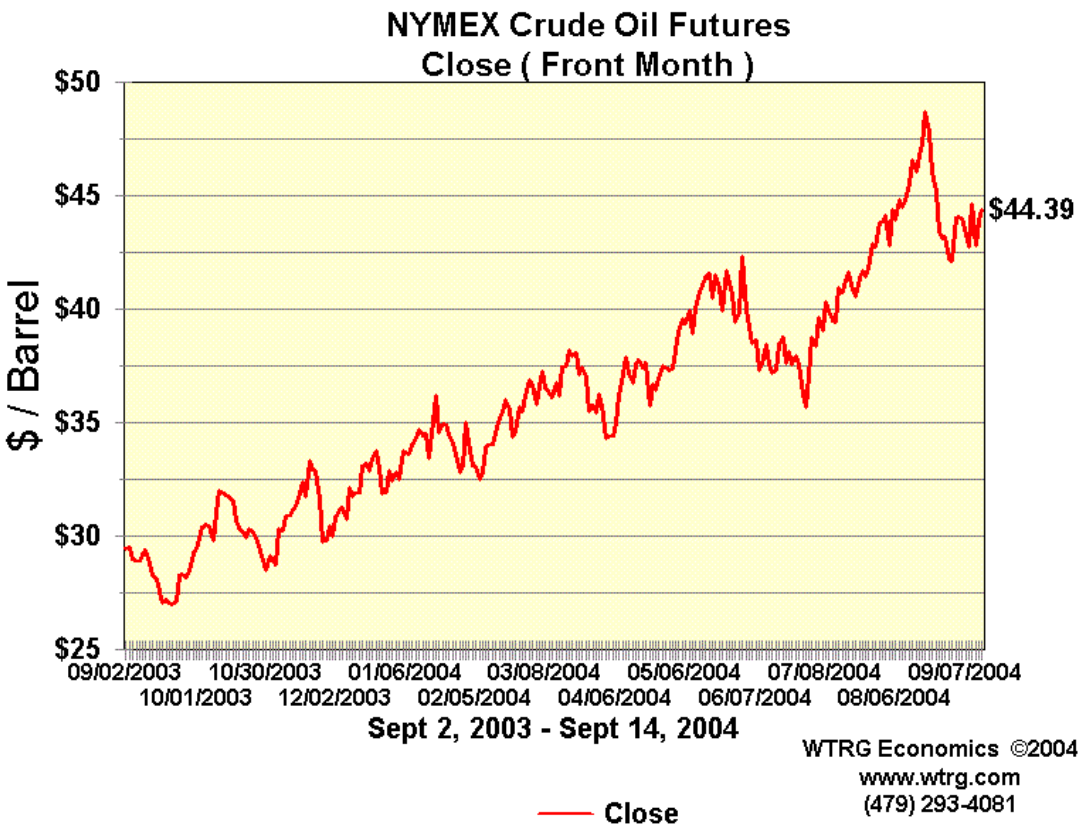


Abbildung 12: Entwicklung der US-Ölpreise (futures front month) September 2003-September 2004, New York Mercantile Exchange (Nymex) [16]

Die Auswirkungen dieser Entwicklung sind offensichtlich: Die Preise steigen massiv – der Erdölkapitalismus geht zu Ende, ein Ergebnis, das sowohl für den Schutz des Klimas wie auch für die Luftqualität in den grossen Metropolen positiv zu würdigen ist. Für die Konsumenten sind diese Entwicklungen kurzfristig aber alles andere als angenehm, denn die Verknappung des Öls führt zu horrenden Energierechnungen und zu einer Zunahme der Konflikte um Erdöl. Dazu gesellen sich die negativen Folgen des Klimawandels, verursacht durch die hemmungslose Nutzung fossiler Ressourcen: Unwetter und Stürme, Trockenheit, Überschwemmungen und seit Menschengedenken nie da gewesene Umgebungstemperaturen.

Die materiellen und immateriellen Schäden dieser Entwicklung sind noch nicht absehbar.

## 3. Übergang zu erhöhter Energie-Effizienz

Wie werden die Konsumentinnen und Konsumenten reagieren? Wenn die Preise steigen, führt dies in der Regel zu einer Reduktion der Nachfrage. Aus einer physikalischen Perspektive arbeiten die Industrieländer erstaunlich ineffizient:

- Im Kraftwerkssektor gehen rund 70 % der Primärenergie als Abwärme verlustig, bevor die gewonnene Elektrizität die Haushalte, Büros und Fabriken erreicht. Danach sind „hinter dem Stecker“ weitere grosse Verluste üblich.
- In konventionellen Benzinmotoren werden rund 88 % der Primärenergie verschwendet, gemessen vom Ölfeld zum Autopneu.

- Wer via Kohlekraftwerk und Stromnetz eine Glühbirne leuchten lässt verschwendet über den ganzen Nutzungsprozess von der Energieressource bis zur Lichtquelle rund 97 % der verbrauchten Energie. [17]

Auf eine bizarre Art sind dies gute Nachrichten, denn sie bedeuten nichts anderes, als dass wir über riesige Effizienzpotentiale verfügen, ohne dass sich unsere Lebensgewohnheiten zwangsläufig negativ verändern.

- Neue Beleuchtungstechniken mit Fluoreszenz-Röhren oder LED-Lichtquellen kommen auf eine viel höhere Ausbeute als herkömmliche Leuchten, dank einem besseren Lumen/Watt-Verhältnis.
- Das gleiche gilt für viele Industriegüter: Motoren, Computer, Fahrzeuge und Heizquelle, die durchweg über ein unausgeschöpftes Effizienzpotential verfügen. [18]

Wenn die Energiepreise ansteigen, wird der Einsatz ausgereifterer Technologien rasch rentabel und es entwickeln sich neue Anwendungen und Märkte.

***Entscheidend: der Netto-Energieertrag***

Um neue Technologien hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit beurteilen zu können, benötigen wir geeignete Instrumente. Massgeblich ist nicht die Quelle der Primärenergie oder der Rest-Verbrauch an fossilen oder nuklearen Brennstoffen, sondern das Verhältnis von Energie-Input zu –Output oder *Energy-return-on-energy-investment* (EROEI). Nicht bloss die Gewinnung von Energie, sondern auch die Substitutionsprozesse in Richtung Energieeffizienz sind anhand dieses Netto-Energieertrags zu beurteilen.

Der EROEI legt die Nettoenergie offen, die aus einem Projekt (Kraftwerk, Effizienz-Technologie) gewonnen wird, nach Abzug sämtlicher (Energie-)Kosten für Planung, Bau, Brennstoffe, Betriebs- und Entsorgungskosten.

# 4. Kein Rückwärts-Salto in der Technologie-Geschichte

Manche Vertreter der Energiebranche und der internationalen Organisationen (z.B. von der Internationale Energie-Agentur IEA in Paris) propagieren angesichts der Erschöpfung der Ölreserven die verstärkte Nutzung der „alten“ Technologien Atomkraft, Kohle oder Erdgas. Im Besonderen schlagen sie auch vor, die Nutzung von unkonventionellen fossilen Vorkommen (Schieferöl, Ölsande) vorantreiben.[19] Diese Energiequellen tragen aber aus einer langfristigen Perspektive wenig zur Lösung der anstehenden Probleme bei.

- **Beispiel Erdgas**: Wie Erdöl ist auch Erdgas eine endliche Ressource mit absehbarer Erschöpfung und rückläufigen Produktionsziffern in vielen Industrieländern. Der Verbrauch von Erdgas führt zur Emission von Treibhausgasen in der Atmosphäre. In den meisten OECD-Ländern hat die Erdgasproduktion den Höhepunkt bereits überschritten und wird in sinkenden Quantitäten produziert.
- **Beispiel Ölsand und Schiefer-Öl:** Ölsande und Ölschiefer werden auch in Zukunft nur einen bescheidenen Beitrag zur Energieversorgung liefern. Eine Anzahl von Firmen, die in diesem Bereich tätig sind, sind mit hohen Kostenüberschreitungen konfrontiert [20] oder gingen in den letzten Jahren schlicht bankrott. [21]

Der Kern des Problems liegt im niedrigen Energieertrag pro investierte Energieeinheit, kombiniert mit einem grossen Bedarf an Wasser, welches zur Verschmutzung von Oberflächen-Gewässern beiträgt, Landschaften grossflächig schädigt und zu Beeinträchtigungen des Grundwassers führt, ganz zu schweigen vom erhöhten Ausstoss von Luftschadstoffen und CO2.

Selbst wenn die Extraktion von Erdöl aus Teersanden in Zukunft mit staatlichen Mitteln subventioniert wird, werden diese Ressourcen eine marginale Rolle beim Ersatz des konventionellen Erdöls spielen, weil neue erneuerbare Energien mit einem wesentlich besseren Energieertrag pro eingesetzte Energieeinheit operieren und deshalb in der Lage sind, grössere Beiträge zur Energieversorgung zu tieferen Kosten zu liefern.

## 5. Die Zukunft der Atomenergie

Schon seit Jahren ist die Rede von einer „Renaissance der Atomkraft." Aber die effektiven Marktanteile der Nuklear-Technologie im Elektrizitätsmarkt sind rückläufig – und wo wären allenfalls die Vorteile einer solchen Strategie? Die hohen Kosten der Atomtechnik sind seit den 60er Jahren nicht beseitigt. Nicht einmal der atomfreundlichen Bush-Regierung ist es bisher gelungen, neue Atomkraftwerke in grösserer Zahl zu lancieren, denn auch sie musste eingestehen, dass Atomenergie wesentlich teurer ist als zum Beispiel Windenergie oder Strom aus Kohle. [22]

Und die externen Kosten der Atomtechnik sind nach wie vor präsent oder erscheinen erst heute in den Bilanzen der Konzerne. Nicht von den Verursachern bezahlt sind die Kosten

- der radioaktiven Strahlung bei Normalbetrieb
- der radioaktiven Verseuchung bei Unfällen oder Terroranschlägen
- des Missbrauchs von bombenfähigen Kernbrennstoffen
- Der Haftpflicht-Versicherung bei Gross-Unfällen
- der langfristigen Kosten der Entsorgung der radioaktiven Abfälle (>100'000 Jahre).

*Figure 72. Levelized electricity costs for new plants, 2010 and 2025 (2002 mills per kilowatthour)*

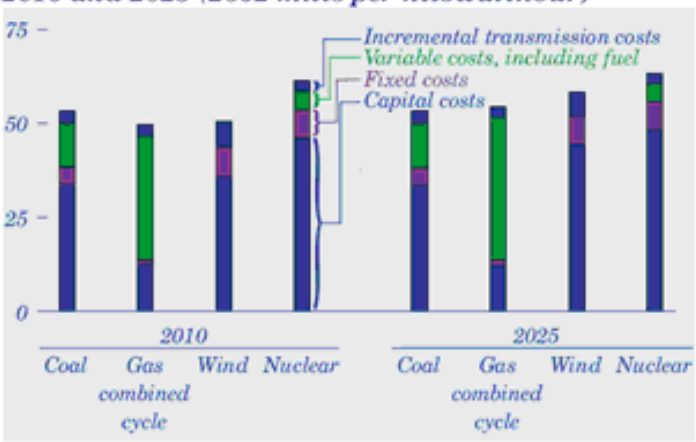

**Abbildung 13: Prognostizierte Stromerzeugungskosten für die Jahre 2010 and 2025 gemäss US-Energy Information Agency [23]**

Auch aus einer rein ökonomischen Perspektive, die alle diese externen Kosten ignoriert, hat die Atomkraft keinen leichten Stand im Wettbewerb auf geöffneten Strommärkten. Ohne massive (Quer-)Subventionen wird sie in den nächsten Jahren kaum Marktanteile gewinnen. Milliarden an staatlichen Mitteln fliessen bereits, um die heutige Atomindustrie am Leben zu erhalten: für die Entseuchung alter Atomanlagen [24] und für deren Sanierung [25], für die Atomforschung und die Entwicklung neuer Reaktoren, sowie für die ungedeckten Kosten der Wiederaufarbeitungsanlagen und der Brennstoff-Konditionierung. [26]

Deutlich mehr Geld ist erforderlich, um neue Werke zu erstellen und zu betreiben. Diese Grossinvestitionen bieten wenig Aussicht auf Kostenreduktionen, wie sie bei den neuen erneuerbaren Energien beobachtet werden können. [27] Atomenergie ist nur in staatlichen Monopolstrukturen „wirtschaftlich“, solange die hohen Einstiegskosten für die erforderlichen Kapitalien, die Kosten für die Konditionierung der Brennstäbe, die Entsorgungs- und Abbaukosten und die Haftpflicht-Versicherung auf staatliche Körperschaften überwälzt und letztlich vom Steuerzahler bezahlt werden.

Dass neue Atomanlagen eine Quelle hoher finanzieller Verluste sein können, wird überall dort offensichtlich, wo die Stromnetze dem Wettbewerb geöffnet und die vertikale Entflechtung von Netzbetrieb und Stromerzeugung durchgesetzt werden.

Abgesehen von den Quersubventionen für den laufenden Betrieb [28] sind den Betreibern nach dem Verursacherprinzip auch die externen Kosten anzulasten. Letztere sind allerdings schwierig messbar: Tragödien wie jene von Sellafield und Tschernobyl sind in der Tragweite der Schäden gar nicht genau zu überblicken. [29]

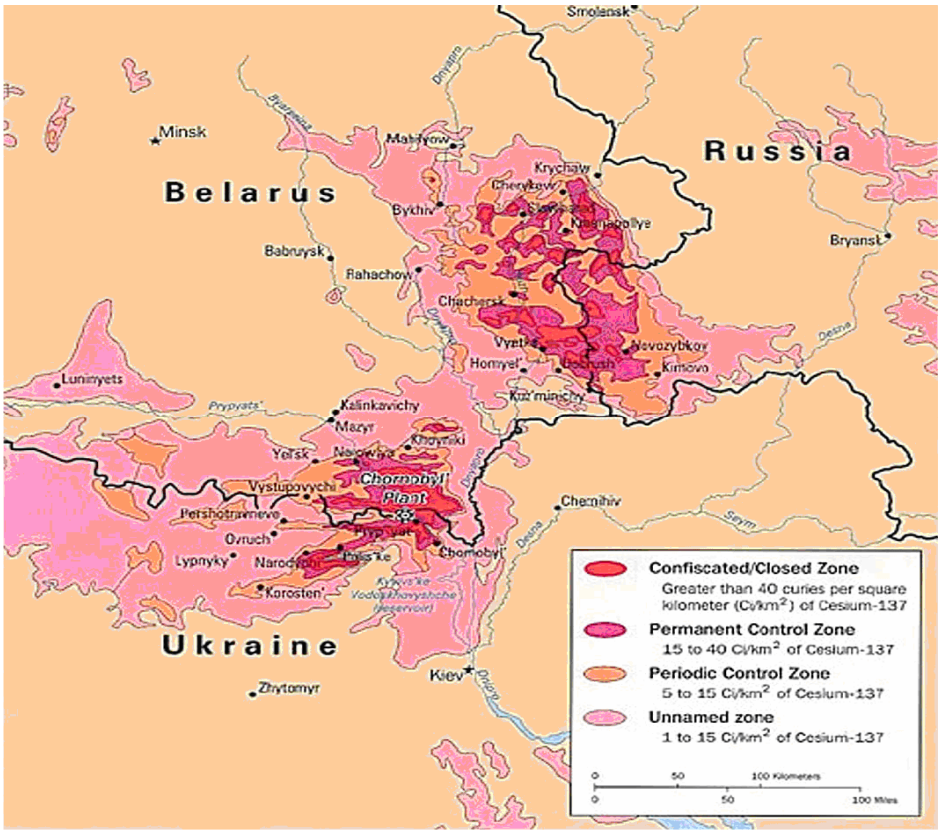


**Abbildung 14: Intensität der radioaktiven Strahlung in Weissrussland, Russland und in der Ukraine [30]**

Zwei Jahrzehnte nach dem Unfall von Tschernobyl leben 2,5 Mio. Menschen in verseuchten Gebieten, mit steigender Kindersterblichkeit, steigenden Morbiditäts-Raten und einer ganzen Anzahl neuer, schrecklichen Krankheitsbildern. [31]

Der Atomausstieg aus rein wirtschaftlichen Gründen hat in verschiedenen Ländern bereits begonnen, ohne dass formell ein Ausstiegsgesetz verabschiedet worden wäre, so namentlich in Grossbritannien, Kanada und den USA. Beim nächsten mittelschweren Atomunfall in einem westlichen Industrieland wird sich die Absetzbewegung beschleunigen. Private Investoren mit Präferenzen für den Energiesektor sollten sich der kommerziellen Risiken der Kernenergie bewusst sein. Nachhaltige Energienutzung ist nur möglich, wenn das Wohlergehen nachfolgender Generationen nicht beeinträchtigt wird. Dies schliesst alle nuklearen Optionen aus.

## 6. Wasserstoff: Bushs Politik intellektueller Umnachtung

Und wie steht es in Zukunft um Wasserstoff als Energieträger? In seiner State of the Union Rede hat Präsident George W. Bush ein Forschungs- und Entwicklungs-Programm für Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Umfang von 1,5 Mia. Dollar angekündigt. Die „Wasserstoff-Wirtschaft“ steht sogar auf der Bestseller-Liste. *Freedom fuel* soll uns aus dem Würgegriff der Ölexporteure befreien. Zurzeit gibt es 985 Organisationen in den Vereinigten Staaten, die sich als Brennstoffzellen-Entwickler, -Forscher, -Vertreiber, -Vereinigung -Labor usw. mit Wasserstoff beschäftigen und registrieren liessen [32].

Wenn man den Wasserstoff-Pfad aber genauer analysiert, taucht eine Menge von Fragen auf. Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern lediglich ein Energiespeicher, vergleichbar mit Batterien, Schwungrädern usw.;

Verglichen mit anderen Energiespeichern ist Wasserstoff ein schwierig zu handhabendes Element. Wegen seiner geringen Dichte und der molekularen Struktur braucht es sehr viel mehr Energie, um eine Wasserstoff-Wirtschaft zu betreiben, verglichen mit der heute benötigten Energie für die Verwendung von Erdöl und Erdgas. Dies gilt auch, wenn eine Wasserstoff-Wirtschaft auf Basis von erneuerbaren Energien betrieben wird.

Die Propagandisten von Wasserstoff zitieren gerne die Effizienz der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in Brennstoffzellen [33], aber häufig vernachlässigen sie die notwendigen Schritte, welche vor und nach dieser Reaktion notwendig sind, namentlich für Herstellung, Komprimierung, Verflüssigung, Transport, Lieferung, Lagerung und Betankung von Fahrzeugen und für die Expansion von Wasserstoff. Eine Anwender-Technologie ist immer nur so effizient wie der gesamte Prozess, auf dem sie beruht – und die Effizienz einzelner Teil-Schritte innerhalb des Gesamtprozesses sagt wenig aus.

Wenn heute Elektrizität aus Erdgas in einem Grosskraftwerk erzeugt wird, sind damit $CO_2$-Emissionen von gut 400 g/kWh verbunden. Wenn Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, liegen die Emissionen bei ungefähr 285 g/KWh. Wird der so gewonnene Wasserstoff anschliessend durch eine Brennstoffzelle geführt zwecks Erzeugung von Elektrizität, dann verdoppeln sich die Emissionen pro erzeugter Stromeinheit ungefähr auf 550 g/KWh, weil die Effizienz einer Brennstoffzelle höchstens bei 50 % liegt [34].

Mit anderen Worten: die Stromerzeugung aus einem Gas-Kombi-Kraftwerk ist wesentlich effizienter hinsichtlich Reduktion der Treibhausgase als Strom aus einer Brennstoffzelle, die mit Wasserstoff aus Erdgas betrieben wird.

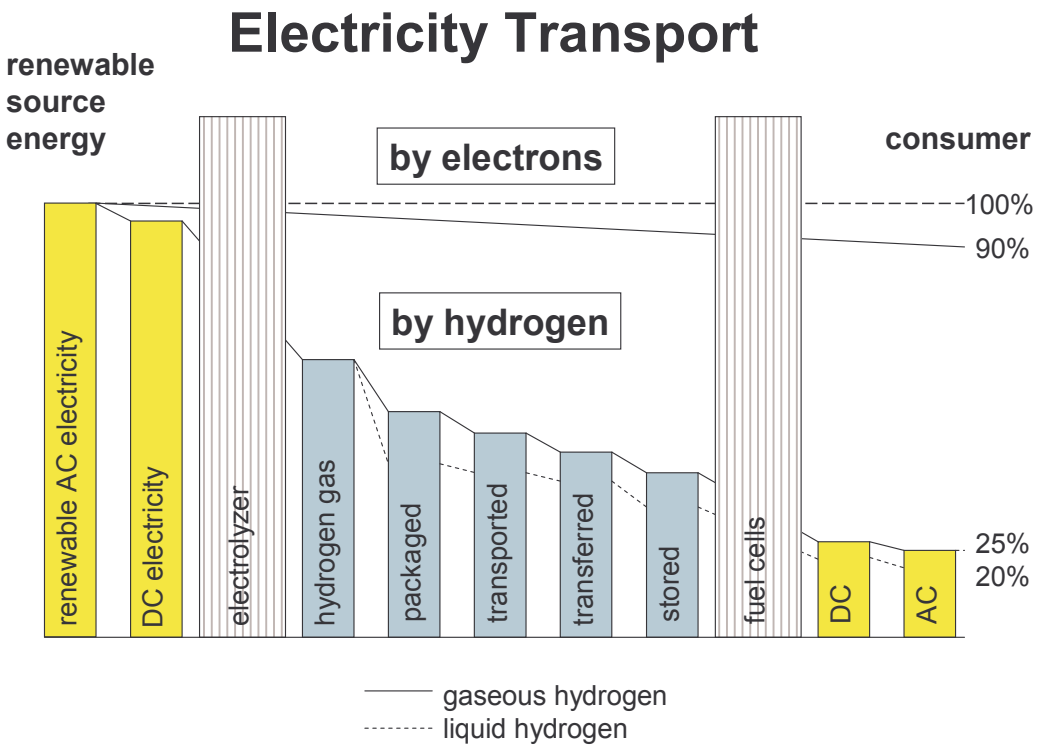


**Abbildung 15: Energieverluste beim Einsatz von Wasserstoff im Vergleich zum direkten Stromtransport von der erneuerbaren Primärenergiequelle bis zum Konsumenten Quelle: Bossel 2004 [35]**

Es gehört zu den fundamentalen Gesetzlichkeiten der Physik, dass die Umwandlung von Energie stets Energie benötigt. Deshalb sollte die Zahl der Konversionen stets möglichst tief gehalten werden und sich auf Schritte beschränken, die nicht zu vermeiden sind. Wer Elektrizität aus erneuerbaren Energien gewinnt, z.B. aus Wind, Wellenenergie, Sonnenlicht oder geothermischer Energie, um mit diesem Strom Wasserstoff zu erzeugen, um Brennstoffzellen zu betreiben, die wiederum Strom produzieren, sollte sich bewusst sein, dass damit ein hochgradig unökonomischer Umweg eingeschlagen wird.

Wasserstoff wächst nicht auf Bäumen. In allen bekannten Anwendungen steht Wasserstoff mit der eigenen Primär-Energiequelle im Wettbewerb, aus der Wasserstoff gewonnen wird. Die originären Energieträger, z.B. Strom, Erdgas oder Kohle, können sehr viel effizienter zu den Konsumenten geliefert werden, wenn man sie in ihrer originären Form belässt, statt zuerst Wasserstoff herzustellen, der als solcher weiterer Energieumwandlungen bedarf, bis nutzbare Energie-Dienstleistungen entstehen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass Wasserstoff aus rein physikalischen Gesetzlichkeiten immer teurer sein wird als die Energiequelle, woraus er gewonnen wird. Weil die Energieverluste beim *Handling* von Wasserstoff sehr gross sind, muss man sich ernsthaft fragen, ob Wasserstoff je in der Lage ist, irgendeines unserer Energieprobleme zu ökonomisch erschwinglichen Kosten zu lösen. Es gibt für fast alle Energieprobleme der Gegenwart bessere Lösungen als die Nutzung von Wasserstoff.

Die ökonomischen Schlussfolgerungen daraus sind wichtig. Ökonomische Erschwinglichkeit ist genau so Aspekt der Nachhaltigkeit wie die Entwicklung von sauberen, sicheren Technologien mit hoher Zuverlässigkeit. Falls eine Wasserstoff-Wirtschaft je kommen wird, wird sie wahrscheinlich am ehesten der Parfümökonomie gleichen: ein Markt, wo die Quantitäten so klein sind, dass die Preise pro Einheit nicht ins Gewicht fallen.[36] Das mag mit wasserstoffbetriebenen Handys beginnen oder mit portablen Computern, wo manche Konsumenten sich nicht daran stören, 10 $ pro kWh für Strom aus Brennstoffzellen zu bezahlen. Aber die Optionen für eine solche Wasserstoff-Wirtschaft scheinen auf den globalen Energiemärkten sehr limitiert.

Trotzdem folgten die Mitglieder der Europäischen Kommission, Loyola de Palacio und Philippe Busquin, George W. Bushs Ruf zur Schaffung einer Wasserstoff-Wirtschaft, und sie widmeten dem Unterfangen die stolze Summe von 500 Mio. Euro, um ein europäisches Wasserstoff-Programm zu lancieren. [37]

Mehr solche Programme, mit einem Gesamtbudget von fast 3 Mia. Euro, für die Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Energien mit anschliessender $CO_2$-Lagerung (Sequestration) und für den Betrieb von „Wasserstoff-Gemeinden“ sollen folgen.

Angesichts so enormer Geldmittel muss man sich fragen, weshalb sich die internationale Forschergemeinschaft derart auf die Einführung eines neuen Energieträgers fixiert, statt die echten, aktuellen Probleme anzugehen: die Reduktion des Energieverbrauchs durch verbesserte Energieeffizienz und durch Einführung von sauberen, einheimischen, erneuerbaren Energien?

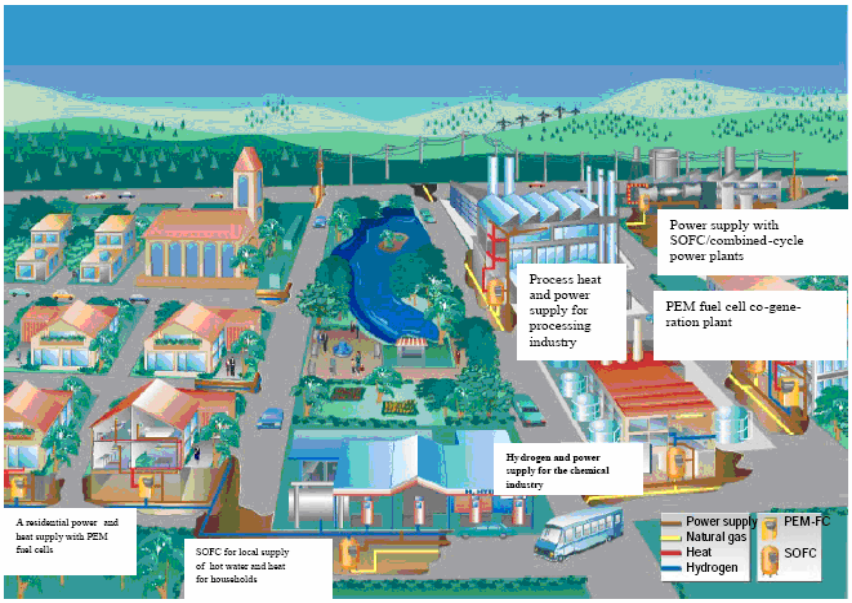


**Abbildung 16: Abbildung aus dem Wasserstoff-Bericht des „High Level Group der Europäischen Kommission: Jede Menge Brennstoffzellen, aber keine Primärenergie-Gewinnung sichtbar. [38]**

Es sind die hintergründigen Aspekte der Wasserstoff-Strategie, die an dieser Stelle etwas mehr Aufmerksamkeit verdienen. Wenn die Mitglieder der Europäischen Kommission und verschiedenste Wissenschaftler erklären, dass „Wasserstoff eine ganze Bandbreite von Primärenergien erschliesst, namentlich fossile Energien, Atomenergie und in wachsendem Ausmass erneuerbare Energiequellen,“ dann ist die Reihenfolge und die Semantik sehr erhel-

lend: fossile Ressourcen zuerst, dann Atomenergie, Erneuerbare später oder vielleicht gar nie!

Das Forschungsbudget für Wasserstoff der Bush-Administration wurde zu einem erheblichen Anteil aus den ursprünglichen Budgets für erneuerbare Energien und Energieeffizienz finanziert. [39] Wind, Biomasse, Geothermie und Effizienzforschung haben im US-Budget an Stellenwert und finanzieller Unterstützung verloren. Die Finanzierung von Wasserstoff füllt die Koffer der Atomindustrie und der Öl-, Kohl- und Gasfirmen und es alimentiert die Forschungsabteilungen der Autohersteller. Sie alle sollen so genannten „sauberen“ Wasserstoff nach ihren eigenen Vorstellungen herstellen.

Die Wasserstoff-Kampagne wird von den Regierungen generös finanziert und von den fossilen und nuklearen Lobbys geschickt gemanagt. Sie haben den Wasserstoff gekidnappt, um ihre eigenen Ziele zu verfolgen, unter Vernachlässigung der ökonomischen und ökologischen Nachteile dieser Strategie, die im Effekt darauf abzielt, die erneuerbaren Energien zu schwächen.

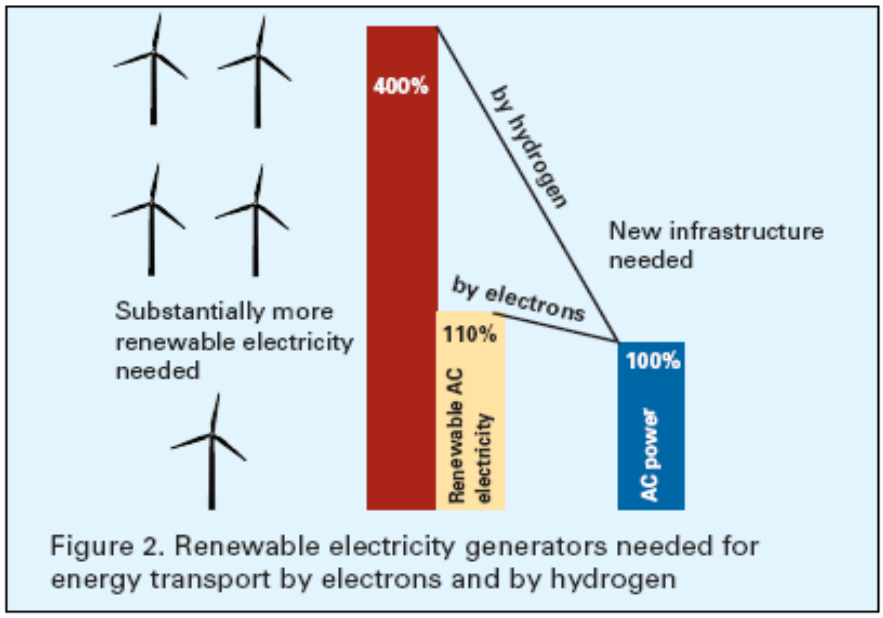


**Abbildung 17: Effizienz von erneuerbaren Primärenergien wie Wind, Sonne, Wasserkraft verglichen mit Wasserstoff** Eine Wasserstoff-Wirtschaft braucht vierfachen Energieeinsatz zur Deckung desselben Verbrauchs an Endenergie. [40]

Heute sind die Effizienzlücken der Wasserstoff-Wirtschaft klar identifiziert. [41] Man braucht viermal mehr primär Energie aus erneuerbaren Energien, um eine Wasserstoff-Wirtschaft zu betreiben, im Vergleich zu einer direkten Nutzung der Elektrizität, die aus Windturbinen über Stromnetze zu den Konsumenten transportiert wird. Ökonomische und ökologische Überlegungen würden gebieten, dass diese unnötigen Umwege vermieden werden.

# 7. Von chemischen Energieträgern zur Nutzung von physikalischen Energien

Vergleichen wir unsere moderne Gesellschaft und die zunehmende Knappheit an billigem Öl mit dem funktionalen System eines Regenwaldes. In einem Regenwald herrscht extreme Knappheit an Mineralien und eine grosse Vielfalt von spezialisierten Organismen, die vom Recycling mittels Sonnenenergie leben, indem sie Materialen wieder verwerten und Hitze abgeben. Unsere eigene Gesellschaft muss abkommen von den nicht-nachhaltigen, atomaren und chemischen Brennstoffen. Sie muss dazu übergehen, den Energiebedarf zunehmend aus nachhaltigen „physikalischen Quellen“ zu bestreiten, ergänzt durch Biomasse aus natürlichen Quellen und aus organischen Abfällen.

Wir haben heute sowohl ein unmittelbares als auch ein langfristiges Problem hinsichtlich der Verfügbarkeit solcher Primärenergien. In den letzten Jahren wurde eine Reihe von neuen Technologien entwickelt, die uns dank ausgereiften Produkten und sinkenden Kosten aus der Abhängigkeit von fossilen und atomaren Energiequellen befreien können. Wind, Sonnenenergie, geothermische Energie und Biomasse sind tatsächlich Energie*ressourcen*, die einen positiven Energieertrag auch dann aufweisen, wenn man die verschiedenen „Energy Investments“ berücksichtigt, die zu ihrer Gewinnung nötig sind. Für Wind beispielsweise liegt der Energy-return-on-energy-investment in der Bandbreite zwischen 80 und 100; das heisst: eine Windturbine produziert 80- bis 100-mal die Energie, die zu ihrer eigenen Herstellung notwendig ist. [42]

Alle erneuerbaren Energien erfordern Energie-Investitionen, bevor nutzbare Energie erzeugt wird. Diese Erst- Investitionen können spezifisch betracht sehr hoch sein, aber auf Basis einer Lebenszyklus-Analyse werden sie mehr und mehr erschwinglich, denn es gibt – mit Ausnahme der Biomasse – keine Brennstoffkosten. Dies führt bei erneuerbaren Energien zu einem hohen Grad von Kostenstabilität, was im Umfeld zunehmender Volatilität der konventionellen Energieträger Öl und Gas von grosser Bedeutung ist. Der stetige Fluss von Primärenergien (Wind, Sonne, Erdwärme usw.) ist kostenfrei, die Betriebskosten bestehen im Wesentlichen aus den Kapitalkosten zur Amortisation der Anlagen.

Windenergie ist ein Schulbuchbeispiel für die extrem grossen Potentiale, die dynamische Kostenentwicklung und die hohe Geschwindigkeit der Markteinführung, die bald auch bei den anderen erneuerbaren Energien erreicht werden könnten, wo die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen werden, namentlich für die geothermische Energie, die Verstromung von Biomasse oder die Photovoltaik.

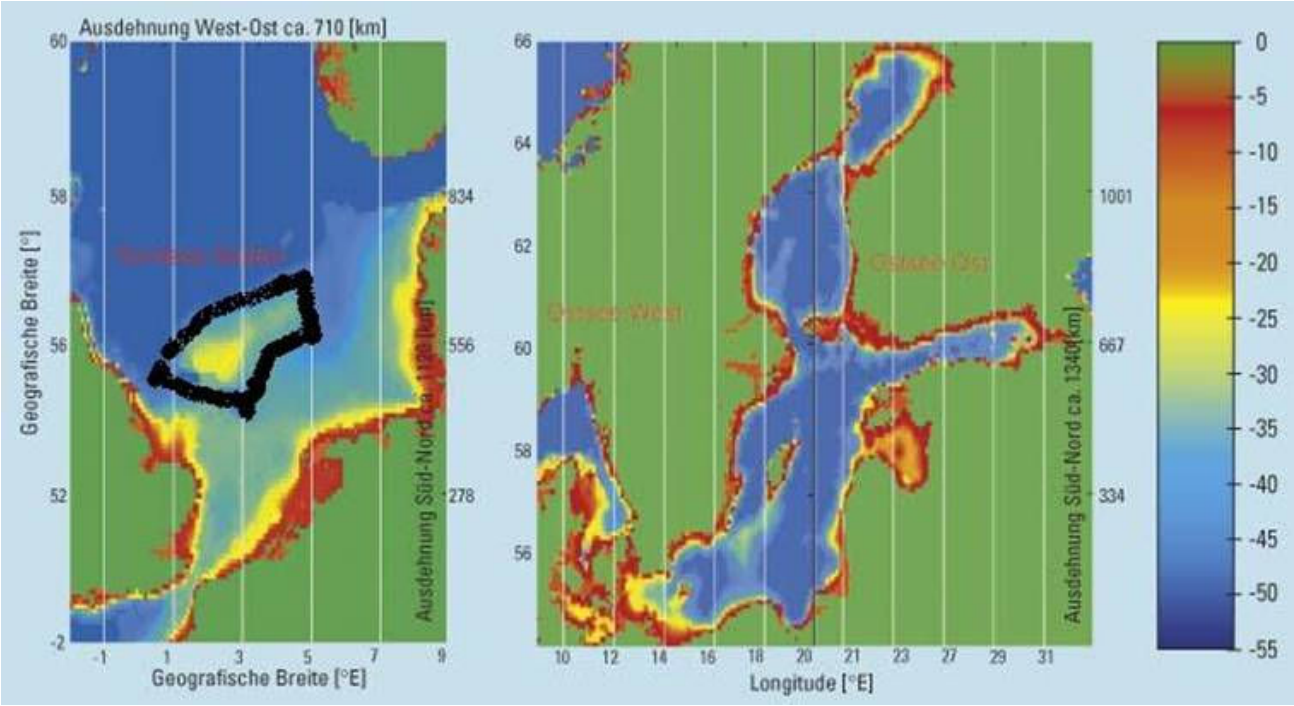


**Abbildung 18: Seetiefenkarte der Nord- und Ostssee: links im Bild die Doggerbank –quantitativ ausreichend zur Deckung des Strombedarfs der Europäischen Union [43]**

Das Potential der Windenergie ist in der Tat enorm: der gesamte Stromkonsum der (ehemaligen) Europäischen Union (EU-15) könnte „Offshore“ auf einer Fläche von 200 km x 200 km erzeugt werden, mit zwei 5-MW-Turbinen pro $km^2$, abgebildet durch das Polygon in der Meereskarte links der obigen Grafik, auf der so genannten *Dogger Bank*, eine riesige, flache Sandbank zwischen dem Osten Englands und dem Westen Dänemarks, mit einer Meerestiefe zwischen 18 und 40 m. Aus Gründen der Versorgungssicherheit wird man es natürlich vermeiden, derart viele Turbinen an einem einzigen Standort zu platzieren; eine dezentralere Ansiedlung von Windturbinen und eine breite Diversifikation verschiedener erneuerbarer Energiequellen erweist sich als praktikabler. Das Beispiel zeigt jedoch die hohen Potentiale zur Nutzung von erneuerbaren Energiequellen, die, geschickt kombiniert, eine viel höhere Versorgungssicherheit gewährleisten als der Import von fossilen Energieträgern aus Krisengebieten oder die Stromerzeugung mit Kernenergie, einem technologischen Gross-Klumpen-Risiko.

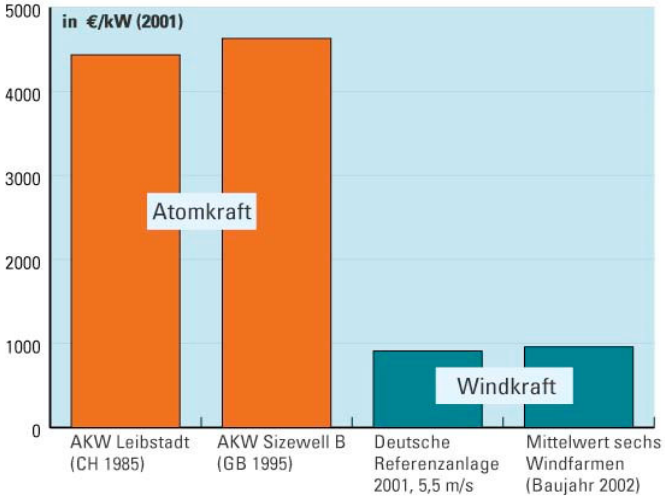


Abbildung 19: Investitionskosten im Vergleich: 1 MW Windenergie und 1 MW Atomkraft, in €/kW zu Preisen von 2001 **[44]**

In den letzten Jahren erfuhr die Windkraft dramatische Kostenreduktionen. An vielen Standorten liegen die Gestehungskosten aus neuen Windkraftwerken heute tiefer als die Gestehungskosten von Strom aus neuen Kohle- oder Atomkraftwerken von gleichwertiger Leistung. Windkraftanlagen sind auch dann noch billiger, wenn man wegen der variablen Windstärke drei bis vier Megawatt Leistung erstellen muss, um ein Megawatt Atomkraft zu ersetzen. Verglichen mit Strom aus Erdgas liefern europäische Windfarmen Strom in jüngster Zeit zu ungefähr ebenbürtigen Kosten. In den USA sind die Kostenvorteile der Windenergie noch grösser, seit sich dort das Erdgas stark verteuert hat. Ein Hindernis bildet jedoch der schlechte Netzzugang, insbesondere in den peripheren Gebieten des Mittleren Westens mit seinen grossen Windressourcen.

Die Ökonomie von Windkraftwerken ist bemerkenswert: die Investitionskosten liegen heute unter 1 Euro/Watt, es sind nur kurze Bauzeiten erforderlich (2 – 20 Wochen bis zur Inbetriebnahme), sowohl Winter- als auch Sommer-Produktionsspitzen sind verfügbar, abhängig von den gewählten Standorten. Wind ist global auf allen Kontinenten und in fast allen Regionen verfügbar; Windkraft verursacht keine Emissionen, verbraucht keine Brennstoffe und es entstehen keine Entsorgungskosten, denn fast alle Bauteile sind rezyklierbar. Die Unterhaltskosten liegen tief und die Gestehungskosten sinken stetig ab, dank wachsender Effizienz der Maschinen und Übergang zur Massenproduktion. Windkraft ist weitgehend immun hinsichtlich der Preisfluktuation von Erdöl und Erdgas. Wind-*Hedging* gewinnt an Bedeutung auf dem US-amerikanischen Strommarkt, weil Erdgas, die bevorzugte Energiequelle für Kraftwerke während der letzten 10 Jahre, nur noch in sinkenden Mengen verfügbar ist und hohe Preisvolatilitäten aufweist.

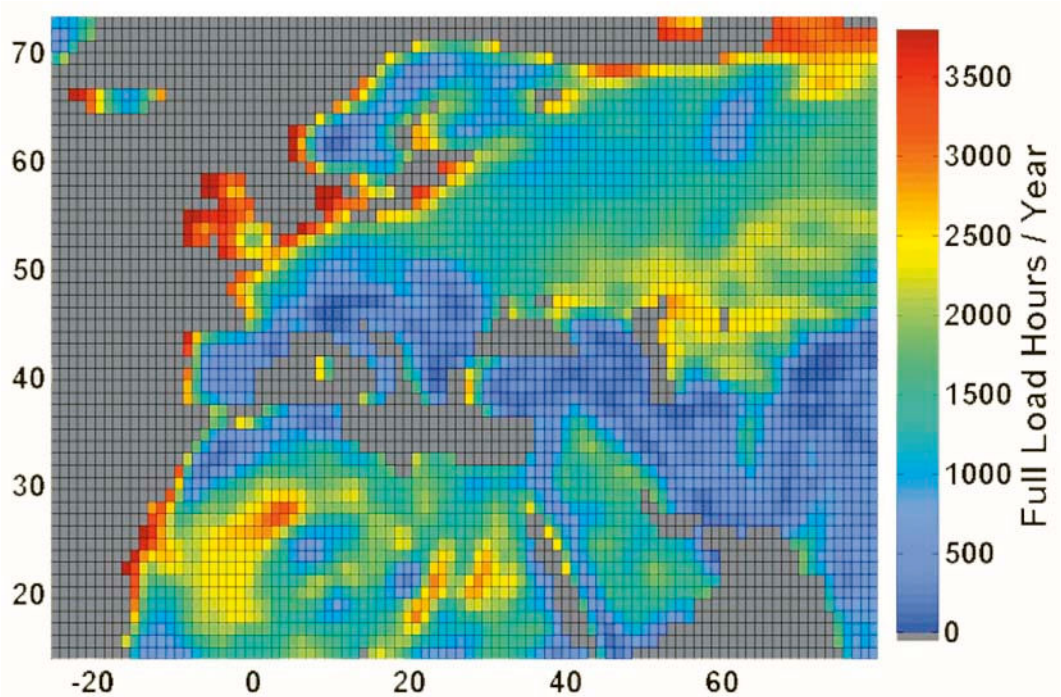


Abbildung 20: Windenergie-Potentiale in Europa und seinen Nachbarländern, ausgewiesen in Volllast-Stunden (Full Load Hours), gemessen und bezogen aus eine Nabenhöhe von 80 Meter. Der Stromverbrauch der Europäischen Union (EU-15 und Norwegen) beträgt 2100 TWh; das Potential der Windenergie beträgt bei 4-8 MW/km$^2$ auf 120‘000–240‘000 TWh. [45]

Anhand von Windkarten lässt sich nachweisen, dass der derzeitige Stromkonsum Europas mittels Windkraftwerken an Land ungefähr 100-fach abgedeckt werden könnte. Weitere Anlagen auf dem Meer (*offshore*) kommen dazu und vergrössern die Möglichkeiten weiter. Dänemark, Deutschland, Grossbritannien und Spanien sind eifrig daran, diese Technologien zu entwickeln, um eine saubere, unerschöpfliche und erschwingliche Stromversorgung aufzubauen. Die umfängliche Ablösung der konventionellen Stromerzeugung durch erneuerbare Energien ist möglich; sie verspricht langfristig tiefere Kosten als das heutige System mit fossilen und nuklearen Energieträgern. [46]

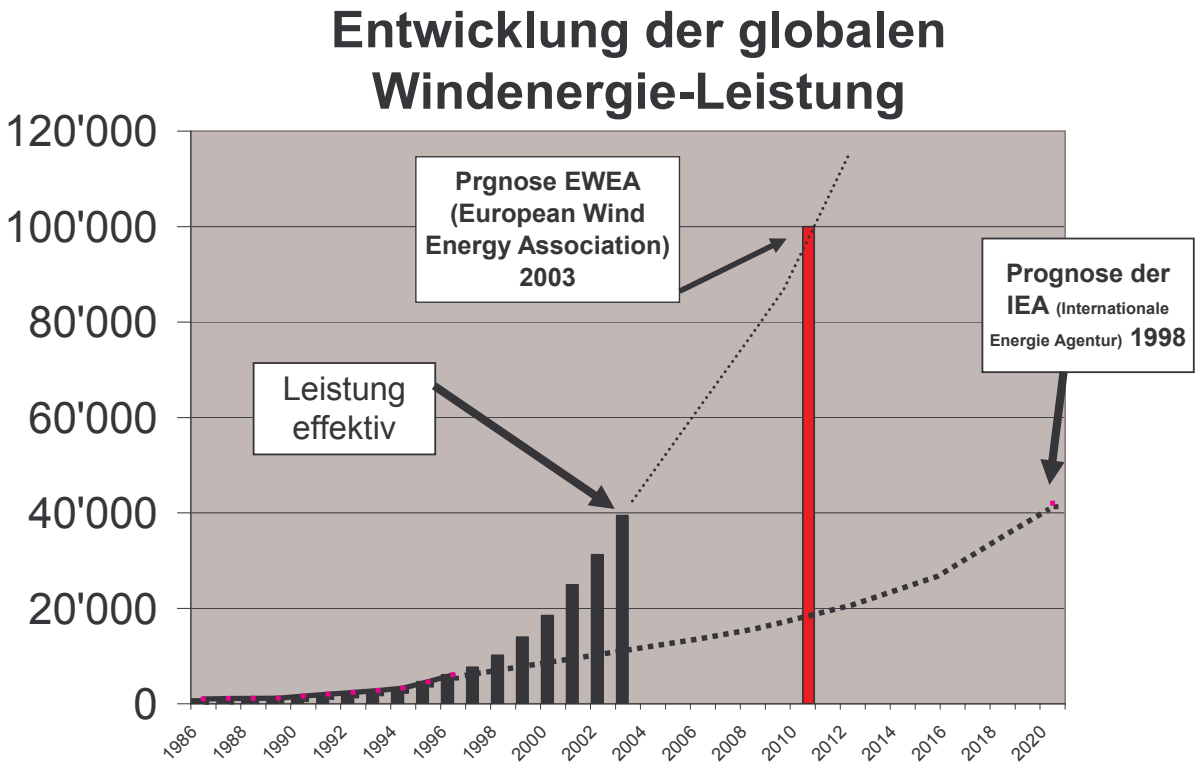


**Abbildung 21: Windenergie: Prognose der IEA, der EWEA und effektives Wachstum [47]**

Trotz den genannten, offensichtlichen Vorteilen der erneuerbaren Energien werden diese Ressourcen und die technologischen Entwicklungen in einer empörenden Art und Weise von den internationalen Organisationen ignoriert und schlecht geredet, namentlich von der Internationalen Energieagentur (IEA) in Paris.

In ihrem „*World Energy Outlook* 1998“ prognostizierte die IEA, dass im Jahre 2020 total gerade einmal 45’000 MW Windkraft-Leistung installiert sein werden. In Realität erreichte die Windenergie zwischen 1998 und 2003 eine jährliche Wachstumsrate von 26 % und war damit die am schnellsten wachsende Stromerzeugungs-Technologie weltweit. Schon Ende 2003 erreichte die installierte Leistung weltweit 39 GW, und das für 2020 prognostizierte Ziel von 45’000 MW wurde im Jahre 2004 überschritten. [48]

Es ist kein Zufall, dass die Wind- und Photovoltaik-Branche während Jahren ausserordentliche Verkaufzuwachse erzielt haben. Diese Markterfolge schlagen sich in einem raschen Wachstum ihrer Marktanteile nieder. [49] Sinkende Kosten und ein gutes Verhältnis von Output/Input sind starke Argumente der meisten erneuerbaren Energien; deshalb werden Erneuerbare zu Recht als Energiequellen bezeichnet – ihr Energieertrag ist höher als die Energieinvestition. Die konventionellen Energieträger (z.B. Erdöl, Kohle, Uran) sind keine echten Quellen von Energie, sondern physikalisch gesehen Energie-Senken.

Erneuerbare Energien werden in Form von Elektrizität, Wärme oder chemisch gespeichert als Biomasse gewonnen. Von diesen drei Energieformen kann Elektrizität am einfachsten zu den Nutzern transportiert werden, und die Energieumwandlung erfolgt mit der höchsten Effizienz. Die Energieverluste sind am geringsten, wenn Strom über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetze (HGÜ) transportiert wird; die Verluste liegen unter 4 % des Energieinhaltes über eine Distanz von 1'000 km.

Gelingt es der EU, die Übertragungsnetze bis 2007 für alle wirksam zu öffnen, können die Erzeuger von erneuerbaren Energien erstmals mit den herkömmlichen, monopolistisch strukturieren örtlichen Versorgern in Wettbewerb treten. Werden die Engpässe der internationalen Netzverbindungen beseitigt und neue HGÜ-Technologien eingesetzt, verliert die Distanz zwischen Stromerzeugung und Verbraucher zunehmend an Bedeutung. Bandenergie aus Windfarmen in Russland oder Irland, Spitzenenergie aus gespeicherter Wasserkraft in der Schweiz oder Norwegen sowie Solar- und Windfarmen aus den Ländern rund ums Mittelmeer können dann zu einer stabilen elektrischen Versorgung von ganz Europa beitragen und werden schrittweise Marktanteile erobern. Ähnliche, ganze Kontinente umfassende Verknüpfungen der Versorgung mit erneuerbaren Energien lassen sich in den USA und vielen anderen Teilen der Welt realisieren.

Kein anderer Energieträger mit erneuerbaren Energien kann die Elektrizität hinsichtlich Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Transport-Ökonomie schlagen. Deshalb sollte Elektrizität nicht in andere Energieträger umgewandelt werden, bevor der Standort des Endverbrauchers erreicht ist.

Heute scheint es so, dass umstrittene Figuren wie der amerikanische Präsident George W. Bush die Energieforschung in eine falsche Richtung führen. Der US-Präsident geht implizit davon aus, dass nach dem Erdöl – ein chemisch gespeicherter Energieträger – erneut ein chemischer Energieträger (Wasserstoff) zum Zuge kommen muss. Doch aus einer ökonomisch-physikalischen Perspektive ist dies alles andere als zwingend.

Die Verfügbarkeit der Primärenergien prägt die Nutzungskette bis zur Endenergie. Der moderne Verbrennungsmotor mit Benzin oder Diesel war eine logische Entwicklung angesichts reichlich grosser Vorkommen von fossilen Ressourcen im 20. Jahrhundert. Die technische Strukturierung einer Gesellschaft, die im 21. Jahrhundert aus erneuerbaren Energien versorgt, wird anders geprägt.

Die Energieversorgung wird breiter diversifiziert und auf verschiedenen Primärenergien beruhen. Es werden sich lokal jeweils Nutzungen durchsetzen, die sich als besonders verfügbar, nützlich und wettbewerbsfähig erweisen:

- Elektrizität aus mechanischen Energiequellen: Wind, Wasserkraft, Meeresenergie
- Elektrizität aus thermischen Energiequellen: Solarenergie, geothermische Energie, Nutzung von festen Abfällen und Biomasse
- Elektrizität aus Sonnenstrahlung: photovoltaische Erzeugung
- Hitze aus solaren oder geothermischen Ressourcen, zur direkten Nutzung für Raumwärme, Warmwasser oder Prozess-Dampf
- Biomasse aus natürlichen Quellen, aus Rohstoff-Farmen und organischen Abfällen

Jede Primärenergie sollte, so lange sich dies als praktisch erweist, möglichst ohne Konversionen Verwendung finden. Besonders sollten wir multiple Konversionen vermeiden, oder Konversionen zwischen physikalischen und chemischen Energien (mittels Elektrolyse, thermischen Kraftwerken, Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen), um die Energieverluste möglichst gering zu halten.

Physik und Ökonomie werden uns den Weg weisen, doch sind politische Rahmenbedingungen und Zielsetzungen dabei nicht unbedeutend. Die Gesetze der Physik können durch politische Mehrheiten nicht umgestossen werden. Erneuerbare Energien werden sich durchset-

zen, weil sie sich über einen hohen Wirkungsgrad von der Quelle zur Energie-Dienstleistung auszeichnen. Je schneller dies geschieht, desto besser – erneuerbare Energien sind gut für alle.

## 8. Erneuerbare Energien und Mobilität

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass Wasserstoff für stationäre Verwendungen weniger effizient ist als die direkte Nutzung von Elektrizität (via HGÜ) oder von Wärme aus erneuerbaren Quellen. Wie sieht es nun aus, wenn Wasserstoff für mobile Geräte eingesetzt wird?

Auch hier gilt, dass die effizientesten Lösungen erreicht werden durch eine effiziente Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie oder durch Umwandlung von Kohlewasserstoffen aus Biomasse in Kohlewasserstoffe aus flüssigen Brennstoffen. In beiden Fällen wird Energie nicht über die Grenze zwischen Physik und Chemie konvertiert.

Die Umwandlung von Biomasse in Methanol oder Ethanol oder die Erzeugung von synthetischen Treibstoffen durch die Verarbeitung von biologischen Kohlewasserstoffen verursacht weniger Verluste als die Umwandlung von Biomasse oder Strom in Wasserstoff, wenn man alle Aspekte des Energiemarktes berücksichtigt. Diese Treibstoffe vermögen mehr Energie zu speichern als Wasserstoff, sie sind allein schon hinsichtlich ihres Raumbedarfes effizienter. Sie enthalten pro Einheit sogar mehr Wasserstoff als gekühlter flüssiger Wasserstoff oder als Wasserstoff-Gas, das mit 800 Bar Druck komprimiert wird.

Biologische Treibstoffe sind von hohem Interesse für die Mobilität, aber Batterie-Fahrzeuge und Pressluft-Autos verdienen ebenfalls eine nähere Betrachtung, verglichen mit der Option Wasserstoff:

Der französische Designer Guy Nègre entwickelt Fahrzeuge, die mit gepresster Luft betrieben werden.[50] Pressluft wird in einem 4-Zylinder Hubkolben-Motor verwendet und liefert die Energie für den Antrieb von Fahrzeugen. Pressluft ist kein neuer Energieträger, aber es ist wohl das erste Mal seit Jahrzehnten, dass ein modernes Pressluftauto entwickelt und getestet wird. Pressluftautos haben einige positive Eigenschaften: Luftmotoren sind klein und von niedrigem Eigengewicht im Vergleich zur Schubkraft, welche sie liefern. Zudem sind sie substantiell billiger als andere Motoren. Pressluft-Tanks können sehr rasch befüllt werden, jedenfalls schneller als Wasserstoff-Tanks oder Batterien. Pressluft-Tanks haben eine fast unbegrenzte Lebenserwartung und die Zahl der Ladezyklen ist sehr hoch; bei Stillstand treten keine Energieverluste auf. Pressluft-Motoren können aus Aluminium hergestellt werden, weil sie nahezu bei Umgebungstemperatur betrieben werden können.

Was die Kosten und die Energiedichte der Energiespeicher anbelangt, ist heute schwierig zu beurteilen, wie hoch die Reichweite von Pressluftautos oder von Batterie-Fahrzeugen sein wird. Batterie-Experten gehen davon aus, dass Reichweiten von 300 km mit der heutigen Batterie-Technologie (Lithium-Ion) möglich sind, ohne dass prohibitive Kosten auftreten [51].

Es ist noch ungeklärt, ob Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine höhere Reichweite erreichen. Bis zur Distanz von 300 km sind elektrische Fahrzeuge den Wasserstoff-Fahrzeugen mit Brennstoffzelle überlegen, was die Einstiegskosten und die Gesamtökonomie anbelangt. Diese

Verhältnisse sollten von der Brennstoffzellen-Fangemeinde anerkannt werden. Denn die Energieverluste von Batterie- oder Pressluft-Fahrzeugen sind weit kleiner als jene von Brennstoffzellen-Fahrzeugen: wenn erneuerbare Energien aus Solarquellen, aus Windenergie oder Wasserkraft zum Einsatz kommen, die mit 90 % Effizienz über ein interkontinentales Übertragungsnetz geliefert werden können, und solange die Pressluft- bzw. Batterie-Verluste (laden/entladen) die Grössenordnung von 20 % nicht überschreiten und eine Rückgewinnung der Bremsenergie vorgesehen wird, scheint eine Gesamteffizienz von 50 % oder mehr in Batterie- und Pressluftautos erreichbar. Dies wäre ein grosser Sprung nach vorne, verglichen mit den Wasserstoff-Fahrzeugen, aber auch verglichen mit den heutigen Benzin-Fahrzeugen, deren Gesamteffizienz (von der Ölquelle bis zum Rad – oder vom Kraftwerk bis zum Rad) in der Bandbreite von nur 9 – 22 % liegt. [52, 53]

Wasserstoff-Anhänger weisen darauf hin, dass Batterie- und Pressluft-Fahrzeuge noch bei weitem nicht ausgereift sind und bei den Konsumenten wegen der geringen Reichweite wenig akzeptiert werden. Dieses Argument war in der Welt des billigen Öls zweifellos richtig. Aber mit zunehmender Verknappung von fossilen Brennstoffen und höheren Preisen können sich neue Technologien wie z.B. Elektro-Fahrzeuge sehr schnell durchsetzen. Darauf deutet der grosse Erfolg der Hybridfahrzeuge von Toyota und Honda hin.

Auch ist das Argument zutreffend, dass die Entwicklung moderner Batterien für Elektro-Fahrzeuge bei weitem nicht so erfolgreich war, wie man sich dies in den letzten Jahrzehnten erhoffte. In Realität haben sich die Batterie-Technologien in den letzten Jahren jedoch in bedeutendem Masse weiter entwickelt, bloss wurden diese technischen Erfolge von den Autoherstellern weitgehend ignoriert [54]. Es fehlen insbesondere moderne Elektro-Fahrzeuge, die von den neuen Batterie-Technologien Gebrauch machen. Mit steigenden Treibstoffpreisen wachsen jedoch die Anreize, diese Technologien in die Fahrzeugtechnik zu integrieren.

Der Toyota Prius beinhaltet fast alles, was ein gutes Elektro-Fahrzeug ausmacht: elektrische Traktion, elektrisches Energie-Management, elektrische Bremsung, 4-türiges Leichtgewicht-Chassis, Pneus mit niedrigem Rollwiderstand und all dies für einen Endverbraucher-Preis von rund US-$ 20'000.--!

Stellen wir in Rechnung, dass Wasserstoff-Infrastrukturen völlig neu aufgebaut werden müssen, während in den meisten Industrieländern eine fast allgegenwärtige Erschliessung mit Elektrizität bereits vorhanden ist, dann erweisen sich Fahrzeuge, die mit Pressluft oder Batterien betrieben werden, als bessere Wahl, die ohne neue Forschungsarbeiten und ohne Entwicklung einer völlig neuen, internationalen Infrastruktur realisiert werden kann.

Wichtiger Teil einer solchen Strategie ist die Verfügbarkeit neuer, zweckdienlicher Energiespeicher: Man denke an Batterien, die dauerhaft im Eigentum des Fahrzeugherstellers bleiben, mit einem dauerhaften, standardisierten Service. An der Tankstelle wird dann nicht mehr Strom oder Wasserstoff getankt, sondern es werden Batterien ausgetauscht, die der Fahrzeughalter bloss mietet und nutzt, die er aber nicht dauerhaft besitzt. Elektro-Fahrzeuge sind viel effizienter als Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Dies gilt erst recht, wenn es gelingt, die heutigen Schwachstellen von Batterie-Technologien (geringe Reichweite, Selbst-Entladung) zu eliminieren und das Vertrauen in ein Service-Netz aufzubauen, das in der Lage ist, individuelle Mobilität zuverlässig zu gewährleisten.

Auf jeden Fall gilt es hervorzuheben, dass Automobile mit Wasserstoffantrieb aus Elektrolyse einen viel höheren Energieverbrauch aufweisen als die Automobile von heute. Eine solche Mobilitäts-Strategie könnte sich nur durchsetzen, wenn sehr grosse Mengen von billiger, sauberer Energie aus erneuerbaren Quellen praktisch kostenlos zur Verfügung stünden. Solange Wasserstoff aber aus herkömmlichen fossilen Quellen gewonnen wird, werden die $CO_2$-Emissionen auf ein viel höheres Niveau ansteigen als heute, und sie würden auch wesentlich höher liegen als beim Betrieb mit Biotreibstoffen, mit Batterien oder Pressluft.

Vielleicht ist es auch gar nicht zwingend nötig, dass Personenwagen entwickelt werden müssen, die über eine sehr grosse Reichweite mittels Batterien verfügen, denn die beschränkte Reichweite bleibt an und für sich auch bei leistungsfähigen Batterien ein Problem, ebenso die benötigte Zeit, um Batterien wieder aufzuladen. Das erfolgreiche Format für moderne, mit erneuerbaren Energien betriebene Fahrzeuge könnte sich aus den heute entwickelten Hybridfahrzeugen entwickeln, wofür der Toyota Prius als Beispiel steht.

Im Vergleich zu heute würden neue Modelle stärker auf eine Betankung mit Strom ausgelegt und die Batterien müssten zu diesem Zweck wesentlich grösser sein. Ein kleiner Benzin- oder Dieselmotor würde das Fahrzeug nur dann betreiben, wenn die elektrisch gespeicherte Energie für längere Fahrten nicht mehr ausreicht. Ein kleiner Generator von sagen wir 15 kW, gespeist aus einem kleinen, 10-15 Liter Benzintank, könnte die optimale Reichweite von Batterien von ca. 150 – 200 km praktisch unendlich ausdehnen, solange es dem Fahrzeughalter nichts ausmacht, alle ca. 200-300 km neu zu tanken. Für die grosse Mehrheit aller Automobilisten könnten die meisten täglichen Verkehrsstrecken aus Batterie-Speichern bestritten werden, die aus dem Stromnetz geladen werden. Eine solche Strategie ist aber nur umweltverträglich, wenn es gelingt, als Primärenergien ausschliesslich erneuerbare Energien einzusetzen. Für die Betankung mit Kohlenwasserstoffen bestünde zudem die Möglichkeit, Biotreibstoffe einzusetzen: Ethanol, Methanol oder synthetische Produkte, die noch in Entwicklung stehen.

Angesichts all dieser Möglichkeiten sollten wir aber nicht den Schienen-Verkehr vernachlässigen, der Personen und Güter hoch effizient von einem Ort zum anderen transportiert und nebenbei eine Reihe weiterer Probleme in städtischen Agglomerationen lösen hilft: Luftverschmutzung, exzessiver Lärm, Bodenversiegelung, hohe Strassenbau- und Unterhaltskosten, Verkehrsstau-Kosten und Verluste durch Unfälle sind beim Bahntransport erheblich geringer als beim individuellen Motorfahrzeug-Verkehr.

# 9. Wasserstoff als Speicher-Medium für erneuerbare Energien?

In nicht allzu ferner Zukunft werden erneuerbare Energien immer grössere Beiträge zur Versorgung in einem integrierten Stromnetz liefern, selbst wenn man die eher konservativen Erwartungen der heutigen Energiepolitiker zu Grunde legt. Glücklicherweise entwickelt sich die Realität schneller als die Politik.

Mit fortschreitender Integration der erneuerbaren Energien benötigen wir ein neues Speicher- und Leistungs-Management. Dabei ist zu betonen, dass die Elektrochemische Speicherung von Energie mittels Batterien oder Wasserstoff (mit reversiblen Brennstoffzellen), nicht zu den billigsten und praktischsten Lösungen gehört. Physikalische Energiespeicherung er-

scheint als bessere Option. Elektrische Energie wird am besten in Speichermedien gespeichert, welche die Elektronen speichern, z.B. mittels Kondensatoren (Super-Caps), als Energiepotential in Speicherseen von Wasserkraftwerken, als Druck-Energie in Pressluft-Tanks, oder mittels Schwungräder und dergleichen.

Viel Energie kann auch in Form von Nutzenergie gespeichert werden, sei dies in Form von Wärme- oder Kältespeichern in Gebäuden und Anlagen usw.. Darüber hinaus können Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetze Strom von einer Region mit Überangeboten in Regionen mit Stromknappheit transportieren, um Mangellagen auszugleichen, die durch das Wetter oder den Verlauf von Tageslast-Kurven verursacht werden. [55]

Windkraft-Anlagen können einfach abgebremst werden, wenn die Stabilität der Stromnetze durch Überkapazitäten gefährdet wird, die in einem bestimmten Gebiet entstehen. Zusätzliche Versorgungssicherheit ist möglich, wenn die installierten Windkapazitäten den durchschnittlichen Tagesbedarf jeweils leicht übersteigen (überkritischer Betrieb). Es ist eine Frage der Kostenoptimierung, auf welche Weise Reserve-Kapazitäten am besten bereitgestellt werden. Alle diese physikalischen Methoden der Energie-Speicherung und des Energie-Managements stehen jedenfalls im Wettbewerb mit den sauberen, aber teuren Speicherlösungen auf Basis von Wasserstoff.

Fossile Ressourcen kommen für das Leistungs-Management ebenfalls in Betracht: es mag schon bald sehr viel ökonomischer sein, Erdgas für das Leistungs-Management in einer international integrierten, hauptsächlich windstrom-betriebenen Stromversorgung einzusetzen als dasselbe Erdgas für die Erzeugung von Bandenergie zu verfeuern.

Solange gewisse Mengen an fossilen Energien in der Stromversorgung als zulässig erachtet werden, scheint es sehr viel nützlicher, diese gespeicherten Energien für das Lastmanagement zu verwenden als sie in Wasserstoff zu wandeln, um fossile Energien im Brennstoff-Sektor einzusparen. Weshalb sollten wir den langen und teuren Umweg wählen, wenn es einen kurzen, billigeren Weg gibt, der uns zum Ziel führt?

Wasserstoff liefert nicht die Lösung für die Energieprobleme der Gegenwart, und so wie es heute aussieht, wird Wasserstoff diesen Anspruch auch in Zukunft nicht erfüllen. Die *Freedom Fuel Initiative* von George W. Bush wird in einer Wasserstoff-Wirtschaft ausmünden, die, wenn sie je realisiert würde, letztlich mehr fossile Energien verbraucht als die heutige Energiewirtschaft. Statt die CO2-Emissionen zu senken, dürfte dieser Technologie-Pfad die Luftschadstoffe eher von einer Aktivität in eine andere Aktivität oder von einem Standort auf einen anderen verlagern als die Gesamtmenge der Treibhausgase zu reduzieren. Im Gegenteil: Die Klimaschädigung dürfte auf diesem Weg deutlich zunehmen. Wir sollten deshalb die Wasserstoff-Option beiseite legen und Ausschau halten nach kostengünstigen und risikofreien sauberen Technologien, über die wir heute bereits verfügen.

## 10. Zehn nötige Schritte in Richtung einer nachhaltigen Energie-Versorgung

Kohle und Erdöl standen am Anfang der modernen, ökonomischen Prosperität industrieller Gesellschaften. Erneuerbare Energien und Elektrizität können den Schlüssel für die Prosperität der Zukunft liefern. Elektrizität ist die effizienteste Energie-Quelle für Eisenbahnen, Strassentransport, Firmen und Wohnhäuser. Elektrizität ist die effektivste Energie-Quelle für Beleuchtungen, speziell im Verbund mit der aufkommenden LED-Technologie. Das gesamte Kommunikationswesen beruht fast vollumfänglich auf Elektrizität. Elektrizität kann mit hoher

Effizienz für die Beheizung von Räumen eingesetzt werden, wenn elektrische Wärmepumpen mit solaren oder geothermischen Wärmequellen kombiniert werden. In einer zukünftigen „Elektronen-Wirtschaft," basierend auf Strom aus erneuerbaren Energien, könnten Wärmepumpen so zu effizienten Energie-Multiplikatoren werden, während der Ersatz von Erdgas durch synthetischen Wasserstoff in stationären Gasöfen zu einer unerträglichen Energie-Verschwendung führen würde, der ungefähr das 2 ½-fache des bisherigen Energieverbrauches benötigte.

Mit dem zu Ende gehenden Erdöl-Zeitalter werden wir unser Energie-System mehr und mehr von einer chemischen auf eine elektrische Grundlage umstellen. Strom wird die Referenz-Energie werden, gegen die alle anderen Formen von Energie Bestand haben müssen. Die Kosten von synthetischem Wasserstoff werden verglichen werden mit den Kosten von Elektrizität, die benötigt wird, um diesen Wasserstoff herzustellen.

Es ist klar, dass eine Wasserstoff-Wirtschaft teurer ist als die Elektrizität, die zu seiner Herstellung nötig ist. Wenn man diesen einfachen Vergleichsmassstab anwendet, erscheint die Entwicklung von neuen Technologien, die die Energie-Nutzung verbessern, weit nahe liegender als die Fokussierung auf Energieproduktion und – Verteilung. Die Techniker der Zukunft werden Entscheidungen treffen, die vielleicht ganz anders ausfallen als jene, die vor ein oder zwei Generationen getroffen wurden. Elektrische Systeme mit ihren hohen Effizienzen werden graduell chemische Energien und ihre Speicher ersetzen, gerade weil letztere eine schlechtere Effizienz aufweisen. Und effiziente elektrische Systeme werden zu einem grossen Teil ineffiziente chemische Energieumwandler ersetzen wie thermische Kraftwerke, Verbrennungs-Motoren oder Brennstoffzellen.

Dies ist keine „Vision" und keine persönliche Präferenz, sondern eine Schlussfolgerung, die sich aus den physikalischen Verhältnissen ableitet, welche unsere zukünftige Energie-Versorgung prägen wird und aus der Notwendigkeit, die erneuerbaren Energien, die wir in Zukunft nutzen werden, effizienter zu verwenden.

Die Energie-Erzeugung aus erneuerbaren Energien wird sich verstärkt regionalisieren. Eine „Ent-Globalisierung" der Energieversorgung steht bevor. Windenergie, Wellenenergie, Wasserkraft, Geothermie und Biomasse können in zeitlicher und örtlicher Hinsicht in definierten Bandbreiten „geplant" und „geerntet" werden. Windfarmen können so platziert werden, dass die günstigsten Windverhältnisse, die Verfügbarkeit von Land, die saisonale Verfügbarkeit wie auch die Distanz zu den Verbrauchern in Rechnung gestellt werden kann. Im Gegensatz dazu gibt es keine Wahl in der Frage, wo ein bestimmtes Ölfeld liegen soll – die Ölgewinnung muss dort stattfinden, wo die Ressourcen gelagert sind, und das mag ein halber Erdumfang von den Endverbrauchern entfernt sein.

Die enorme Infrastruktur zum Transport von Öl und Gas wird nur noch von beschränktem Nutzen sein im Wettbewerb mit hoch effizienten Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsanlagen, die den Strom zu den industriellen und privaten Verbrauchern führen. Im Jahre 2050 sind wir vielleicht soweit, dass Energie überhaupt nicht mehr als chemische Ware transportiert wird, sondern als „reine Energie" in Form von unsichtbaren Elektronen.

Wir bewegen uns rasch in Richtung einer neuen Energie-Welt – nichts belegt dies deutlicher als die Preisentwicklung für Erdöl und -Gas. Energie ist im Kern an fast allen Problemen beteiligt, mit denen sich die Menschheit konfrontiert sieht. Wir dürfen hier keine Fehler machen. Wir sollten nicht davon ausgehen, dass die existierenden Energieindustrien in der Lage sind, die Lösungen für die Zukunft von sich aus zu liefern.

Wir müssen die Basis für eine neue Energie-Prosperität für uns selber finden, denn dies ist von grosser Bedeutung für die Sicherung des Weltfriedens. Energie muss verfügbar, erschwinglich und sicher für alle werden. Um dies zu erreichen müssen wir die bestehenden Technologien verbessern und anpassen. Zudem brauchen wir neue Energie-Politiken für nachhaltige Lösungen, die ich in 10 Punkten festhalte:

1. Wir brauchen Preisanreize und neue Regulierungen, um den Pro-Kopf-Energie-Verbrauch und die pro-Kopf-$CO_2$-Emissionen zu reduzieren. Dies erfordert eine erhöhte thermodynamische Effizienz des gesamten Energie-Verbrauchs. Um dies zu erreichen sollten die laufenden Projekte für ökologische Steuerreformen vorangetrieben und Schritt für Schritt international harmonisiert werden, als integraler Teil der WTO-Verträge. Energiepreise sollten ausreichend hoch sein, um verschwenderisches Verhalten zu bestrafen und sie sollten Anreize geben, die Energie-Effizienz quer über sämtliche Verbräuche zu verbessern, ganz besonders im Strassentransport.

2. Windenergie entwickelt sich zur kostengünstigsten Stromerzeugung weltweit. Andere erneuerbare Energie-Technologien sind aber immer noch teurer als abgeschriebene thermische Kraftwerke. Um eine Diversifikation der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien herbeizuführen ist es entscheidend, dass alle Betreiber von Kraftwerken mit erneuerbaren Energien garantierte Einspeisetarife erhalten, die die spezifischen Erzeugungskosten decken, mit einer degressiven Entwicklung der Einspeisevergütung im Zeitablauf, so wie dies im Deutschen-Erneuerbaren-Energien-Gesetz derzeit praktiziert wird. [56]
   Die Energie-Konsumenten und im Speziellen die Industrie werden von diesen Investitionen früher oder später in höchstem Masse profitieren, sobald die zu Beginn etwas höheren Lernkosten abgeschrieben sind. Erneuerbare Energiequellen lassen sich zu extrem tiefen Kosten nutzen, wenn die Einstiegskosten einmal überwunden sind, wie sich an den tiefen Kosten von älteren Wasserkraftwerken nachweisen lässt. Mit Massenproduktion und Technischem Fortschritt werden erneuerbare Energien billiger werden als die Energieträger Erdgas oder Atomkraft, deren Kosten sich durch die Verknappung endlicher Vorräte tendenziell erhöhen.
   Deshalb sollten garantierte Mindestpreise für alle erneuerbaren Energien mit geringen oder gar keinen externen Kosten zur Anwendung gelangen, wo immer ein langfristig nutzbares Potential an Primärenergien und Aussichten auf Kostenreduktionen bestehen. Bis heute erfüllen die meisten erneuerbaren Energien, wenn sie professionell und mit Respekt vor der Natur betrieben werden, diese Bedingungen. Es gibt jedoch Ausnahmen. Dazu gehören Staudämme von grossen Wasserkraftwerken und die Nutzung von Biomasse durch Entwaldung, wie sie insbesondere in manchen Ländern der dritten Welt praktiziert wird.

3. Es sollten Modelle entwickelt werden, die auch für Stromimporte garantierte Mindestpreise vorsehen. Dies eröffnet den Zugang zu günstigeren Primärenergien in entfernten Exportländern (z.B. Russland, Kasachstan, Marokko) was sowohl für die Exportländer als auch für die europäischen Importländer von Vorteile bieten kann. Ein geographisch diversifiziertes Energie-System ist auf die Dauer nicht teurer als die herkömmliche Stromerzeugung mit fossilen und atomaren Techniken. [57].

4. Leistungsfähige Fernübertragungs-Netze mit Gleichstrom haben eine zentrale Bedeutung für die Entwicklung von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung. Sie verbessern die Versorgungssicherheit und gewähren Zugang zu Regionen mit hohem Ange-

bot an erneuerbaren Primärenergien. Integrierte Versorgungsmuster mit erneuerbaren Energien lassen sich für alle industrialisierten Zonen der Welt entwickeln. Statt einer Einbahnstrasse, welche die Nutzer mit elektrischer Energie aus dem Kraftwerk bedient, werden die Netze der Zukunft Mehrweg-Netze sein, auf dem Elektronen hin und her transportiert werden, je nach Tages- und Jahreszeit und je nach lokaler, regionaler oder kontinentaler Verfügbarkeit von Angebot und Nachfrage.

5. Zu einem gewissen Ausmass sollte die Stromproduktion lokal verankert bleiben – aus Sicherheitsgründen und zum Schutz unverzichtbarer *Life-line-Services* (Spitäler, Feuerwehr, Notstromversorgung von Kommunikationsanlagen usw.). Wir brauchen deshalb ein Gleichgewicht zwischen lokal erzeugter Energie und billigen Importen. Möglicherweise wäre es dienlich, eine Mindestquote für erneuerbare Energien in situ für jeden Haushalt und für jede Firma festzuschreiben, zwecks höherer Versorgungssicherheit, aber auch damit die Konsumenten zu einer effizienten Nutzung „hinter dem Stecker“ zu veranlassen, wenn die Mindestquote im Verhältnis zum Jahresverbrauch festgesetzt wird. Eine verbesserte Energieeffizienz, zum Beispiel durch systematische Energie-Analysen, Minimierung der Standby-Verluste und eine rigorose Selektion bei der Anschaffung neuer Geräte (A-Klasse, A+-Klasse) hilft nicht nur, die Verbräuche zu minimieren, sondern kann auch Kosten sparen.

6. Um die verschiedenen Energieflüsse ökonomisch zu bewirtschaften, bedarf es korrekter Preissignale mittels *real time*-Tarifierung, so dass die verfügbaren Kapazitäten optimal genutzt werden. Moderne Informations-Technologien können dazu beitragen, die Verbräuche auf der Verwenderseite effizienter zu gestalten und die Gleichzeitigkeit von Produktion und Konsum von Elektrizität systematisch herbei zu führen.
   Ein gutes *Demand-Side-Management* verringert die Notwendigkeit für Reserve- und Regulierungs-Kapazitäten, die den Gipfeln und Tälern des täglichen Lastgangs folgen. Im Gesamtsystem werden auf diese Weise weitere Kosten gespart.

7. Werden korrekte Anreize vermittelt, dürfte die meiste Elektrizität synchron zur Erzeugung verbraucht werden, so dass nur wenig Bedarf an Stromspeichern besteht. Des Weiteren können manche Geräte wie Elektro-Fahrzeuge, Heizungen und Kühlungen oder private Waschmaschinen so programmiert werden, dass Elektrizität aus dem Netz gezielt während Schwachlast-Zeiten konsumiert wird. Sogar Laptop-Computer und andere elektronische Geräte mit Batterie-Speichern könnten so programmiert werden, dass sie sich während Spitzenlast-Zeiten aus dem Netz ausklinken. Speichermöglichkeiten und Zeitmanagement der elektrischen Energie sind entscheidend für die Stabilität und Robustheit einer Versorgung, die auf solarer, geothermischer und Windenergie als hauptsächliche Lieferanten von Primärenergien beruht.
   Soweit Speicherung trotz dieser Massnahmen eine Notwendigkeit bleibt, sollte sie vorwiegend lokal erfolgen, also in der Nähe des Verbrauchers, statt zentral, etwa in Form von Wasserstoff-Infrastrukturen. Stellen wir uns vor, dass im Jahre 2050 jedes Haus, jedes Geschäft und jedes Auto seine eigene elektrische Energie-Versorgung mit Energie-Speicher und Wärmerückgewinnung aufweist: eine ununterbrechbare Reserve, die übers Ganze gesehen den Bedarf eines jeden Eigners während wenigstens 24 Stunden decken kann. [58]
   Basierend auf den alten Blei-Säure-Batterien würde eine elektrische Energieversorgung für ein typisches Appartement mit 100 kWh Speicher Kosten von über $ 20'000 verursachen und auch räumlich einigen Bedarf verursachen. Aber es ist möglich, das Volumen solcher Installationen zu verkleinern und die Kosten zu senken. Moderne

Kondensatoren oder moderne Batterien könnten zu neuen Lösungen führen.

8. Dieses Energie-System, das vollumfänglich auf erneuerbaren Energien beruht, wird in fundamentalen Aspekten ein Marktsystem bleiben. Energie wird dort produziert, wo es am billigsten ist und wo die Verfügbarkeit mengenmässig und in zeitlicher Hinsicht den Bedarf am effektivsten deckt. Damit diese Umstellung rasch gelingt, sollten wir die Subventionen für nicht erneuerbare Energien auf Null senken. Wir brauchen gute Rahmenbedingungen und entsprechende Gesetze, diesmal aber nicht zur Subventionierung des Nuklear-Sektors oder für die Gewinnung von Kohle, sondern durch eine korrekte Abgeltung von erneuerbaren Energien ohne externe Kosten und für die Schaffung eines leistungsfähigen Übertragungsnetzes.

9. Null-Energie-Häuser sind heute bereits am Markt verfügbar. Wir sollten deshalb die billigste Energiequelle nicht vergessen, die wir haben: Energie-Effizienz. Strengere Vorschriften sollten rasch auf alle Produkte Anwendung finden – Vorschriften, wie sie in Form von Sicherheits-Standards für elektrische Geräte längst bestehen und nun zur Bekämpfung der Energieverschwendung Anwendung finden müssen.

10. *Last but not least*: die Forschung für die Gewinnung und Verteilung von erneuerbaren Energien sollte verstärkt werden, ebenso die Forschung für Energie-Speicherung, für ein modernes Last-Management, für Kondensatoren und Supraleiter, für fortgeschrittene Batterie-Techniken sowie für alle praktischen Methoden, Biomasse in synthetische Treibstoffe umzuwandeln.

---

1 Dieser Text wurde in kürzerer Fassung an der Weltkonferenz für erneuerbare Energien (Renewables 2004) in Bonn (am 3.Juni 2004) und am European Fuel Cell Forum in Luzern (29. Juni 2004) referiert.

2 Die Abbildungen stammen aus: Rudolf Rechsteiner: Grün gewinnt – Die letzte Ölkrise und danach (Orell Füssli Verlag AG, Zürich 2003). Dort sind auch die Quellenangaben vermerkt.

3 Daten: US Energy Information Agency (EIA)

4 Daten: US-Energy Information Agency

5 Jean Laherrère: Forecasting future production from past discovery, OPEC and the global energy balance: towards a sustainable energy future, Vienna Sept. 28–29, 2001

6 Werner Zittel, LB-Systemtechnik GmbH: Analysis Of the UK Oil Production, A contribution to ASPO (Association for the Study of Peak Oil), Extended version, Ottobrunn, 22nd February 2001, p.7; Production numbers since 1/99 (red line): International Petroleum monthly, January 2003 www.eia.doe.gov/emeu/ipsr/t11b.xls

7 Werner Zittel, LB-Systemtechnik GmbH: Analysis Of the UK Oil Production, A contribution to ASPO (Association for the Study of Peak Oil), Extended version, Ottobrunn, 22nd February 2001 p.9; Jahresdaten (gelbe Linie): International Petroleum monthly, January 2003 www.eia.doe.gov/emeu/ipsr/t11b.xls

8 US-Energy Information Agency: International Petroleum Monthly, Oil Production, Feb.2004 http://www.eia.doe.gov/emeu/ipsr/t11b.xls

9 K. Aleklett and C.J.Campbell: The Peak And Decline Of World Oil And Gas Production, Uppsala 2003, www.peakoil.net,

10 http://www.peakoil.net

11 Werner Zittel, Jörg Schindler: The imminent peak of Oil Production, Graphs, Berlin 2003

12 Zur Opec gehören: Algerien, Indonesien, Irak, Iran, Katar, Libyen, Saudi-Arabien, Venezuela, Vereinigte Arabische Emirate

13 A. F. Alhajji and James L. Williams¨ Measures of Petroleum Dependence and Vulnerability in OECD Countries, originally published in the Middle East Economic Survey (MEES 46:16, April 21, 2003) http://www.wtrg.com/oecd/OECD0304.html

14 Colin J. Campbell: The assessment and importance of oil depletion, Powerpoint Presentation, Aspo-Workshop 2002, Uppsala; http://www.isv.uu.se/iwood2002/

15 http://www.oilnergy.com/1gnymex.htm#since30

16 http://www.wtrg.com/daily/crudeoilprice.html

17 3% Verlust in der Kohlemine, 70% im Kohlekraftwerk, 5% in den Stromnetzen und 90% der verbliebenen Energie in der Glühbirne in Form von Abwärme.

18 Eberhard Jochem (Editor):Steps towards a sustainable development, A White Book for R&D of energy-efficient technologies, Zürich 2004, ISBN 3-9522705-0-4

19 Vgl. Dazu die Ässerungen von Robert Priddle und Fatih Birol: “IEA chief says energy security favors unconventional resources”, Oil & Gas Journal, Nov. 26 2002

20 Patrick Brethour: Units in Canadian Oil Sands Trust plummet at news of huge cost overrun, Globe and Mail  march 6, 2004

21 Der Kollaps der Firma *Southern Pacific Petroleum* im Jahre 2003 markiert das Ende der Ölschiefer-Gewinnung in Australien. “It was a complex and inefficient process. In fact, shale oil is not actually oil at all, but kerogen, with the shale heated and the resulting vapour becoming liquid oil when cooled.”  Vgl. Brian Robins: Shale-oil dream ends in company collapse, The Age, December 3, 2003 http://www.theage.com.au/articles/2003/12/02/1070351580970.html

22 "No new nuclear units are expected to become operable between 2002 and 2025, because natural gas and coal-fired units are projected to be more economical." Source: US-Energy Information Agency: Annual Energy Outlook 2004 with Projections to 2025 Market Trends – Electricity http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/electricity.html

23 US-Energy Information Agency: Annual Energy Outlook 2004 with Projections to 2025, http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/index.html

24 Just to cite *one* example of clean up cost for one site in Kentucky, taken from: *GAO report number GAO-04-278T ‘Nuclear Waste Cleanup: Preliminary Observations on DOE's Cleanup of the Paducah Uranium Enrichment Plant', December 06, 2003,* driven from Statement of *Robin M. Nazzaro, Director Natural Resources and Environment:* “In 1988, radioactive contamination was found in the drinking water wells of residences located near the federal government’s uranium enrichment plant in Paducah, Kentucky, which is still in operation. In response, the Department of Energy (DOE) began a cleanup program…. DOE estimates these activities will bring the total cost to over $13 billion through 2070.“ See http://www.gao.gov/atext/d04278t.txt

25 *BNFL bill for Magnox plants' shutdown could rise to £3.2bn*, Terry Macalister, The Guardian, Thursday July 10, 2003; und: *New body may let BNFL off the hook: Taxpayer to pay for decommissioning as nuclear industry is opened to private sector,*  The Guardian, 2000-11-20

26 “BNFL reported a pre-tax deficit on ordinary activities of £1.1bn, compared with £2.3bn a year earlier; turnover was roughly static at £2.2bn. Its total exceptional charges were £827m.” Terry Macalister: Nuclear clean-up costs may double, BNFL bill for Magnox plants' shutdown could rise to £3.2bn, The Guardian, July 10, 2003.  Of course the French nuclear complex raises similar deficits but there is no accounting of those costs in France because of “absolutist power” of Eléctricité de France (“l’état c’est moi…”)

27 For wind energy, cost reductions of some 3% each year were proved. Cf. Dipl.-Phys. Dr. Thomas Neumann, Dipl. Wirt.-Ing. Carsten Ender, Dipl.-Ing. Jens-Peter Molly: Studie zur aktuellen Kostensituation 2002 der Windenergienutzung in Deutschland vom 15.Oktober 2002. For 2010 wind power cost of 2,3-2,6 Euro-Cent/kWh, for 2020 1.8-2.1 Euro-Cent/kWh are foreseen. Source: «The Windicator», Windpower Monthly Vol. 18, Nr.10, October 2003, S.70

28 “European Commission regulators and the U.K. government are close to an agreement on a 1.5 billion-pound ($2.7 billion) state bailout for  British Energy Plc, the country's biggest [nuclear] power generator… The U.K. government in 2002 agreed to lend British Energy 650 million pounds and assume some liabilities. The company said a 40 percent drop in power prices following liberalization of the market left it unable to pay its bills.”  Bloomberg: EU, U.K. Near Accord on British Energy Rescue Aid, People Say, May 10 2004, http://quote.bloomberg.com/apps/news?pid=10000102&sid=aPo5NP4z54lg&refer=uk

29 Zu den Schäden durch die Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield vgl. die Berichterstattung in The Guardian, zB. *BNFL to continue releasing 'killer' gas* www.guardian.co.uk/nuclear/article/0,2763,1296360,00.html  Environment Agency accepts that Thorp reprocessing plant could be closed before it finds a way to control release of Krypton 85, Paul Brown, The Guardian  September 3, 2004,

30 http://freelancer.ag.ru/rebase/fallartr.htm&h=1154&w=1070&sz=108&tbnid=z9-Vo4hZ7EJ:&tbnh=149&tbnw=139&start=9&prev=/images%3Fq%3Dchernobyl%26hl%3Dde%26lr%3D%26ie%3DUTF-8

31 Cf.:Fernex, Michel: The Chernobyl Catastrophe And Health Care, http://iph.bdg.by/Socium/fernex_en.htm;
Wladimir Tchertkow: atomic lies, film produced by Swiss TV (TSI 2003). Script to be found at http://www.comite-bandajevsky.org/zzz_angl/Whos%20who/script.doc;

Rosalie Bertell: Avoidable Tragedy post-Chernobyl, A Critical Analysis, International Association of Humanitarian Medicine, Journal of Humanitarian Medicine, Vol. II, No. 3, pp 21 - 28. http://www.xs4all.nl/~stgvisie/VISIE/AvoidableTragedyPostChernobyl.html

32 Mark Sardella: The Hydrogen Hallucination, http://:www.solaraccess.com/news/story?storyid=5497

33 Cf. for example: Werner Weindorf, Ulrich Bünger, Jörg Schindler: Comments on the Paper by Baldur Eliasson and Ulf Bossel: The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, http://www.hyweb.de/News/LBST_Comments-on-Eliasson-Bossel-Papers_July2003_protected.pdf p. 18

34 Cf. European hydrogen vision under fire: Windpower Monthly News Magazine, May, 2003 p. 53

35 Ulf Bossel: The hydrogen 'illusion'; why electrons are a better energy carrier, Cogeneration and On-Site Power Production March–April 2004 p. 55-59, http://www.efcf.com/reports

36 Matthew Wald: Questions about a Hydrogen Economy, Scientific American, May 2004

37 http://www.euireland.ie/news/research/ See also about the program: EC High Level Group For Hydrogen And Fuel Cells: Hydrogen Energy And Fuel Cells – A Vision For Our Future, Summary Report, June 2003 http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hydrogen_summary_report.pdf

38 Taken from the draft report HLG draft report (v4.8 1/04/03) HYDROGEN ENERGYAND FUEL CELLS – A VISION OF OUR FUTURE, http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/hlg_interim_report_en.pdf

39 So according to an Environmental and Energy Study Institute (EESI) budget analysis. Spending for hydrogen research increases by more than 49%, causing the office to move $83.7 million or about 7.3% of its renewable energy and conservation budget in 2004 to that research. See Windpower Monthly News Magazine, May, 2003 p.50

40 Ulf Bossel: The hydrogen 'illusion'; why electrons are a better energy carrier, Cogeneration and On-Site Power Production March–April 2004 p. 55-59, http://www.efcf.com/reports

41 Bossel, Ulf, Baldur Eliasson, Gordon Taylor: The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? Version of 15 April 2003 updated for distribution at the 2003 Fuel Cell Seminar 3 – 7 November 2003, http://www.efcf.com/reports

42 The Energy Balance Of Modern Wind Turbines, Wind Power Note, No. 16, December 1997

43 Gregor Czisch: Global Renewable Energy Potential - Approaches to its Use, http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/folien/magdeb030901/overview.html

44 Quelle: KKW Leibstadt AG, windpower monthly und Thomas, Steve: *The economics of new nuclear power plants and electricity liberalisation: Lessons for Finland from British experience*, University of Greenwich, 2002 For details see Rudolf Rechsteiner: Grün gewinnt – Die letzte Ölkrise und danach, Zürich 2003

45 Cf. Gregor Czisch, Least-Cost European/Transeuropean Electricity Supply Entirely with Renewable Energies, ISET 2004, http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/projekte/Eur-TranseurElSup.pdf

46 Vgl. die zit. Arbeiten von Gregor Czisch et al., a.a.O.

47 Vgl. IEA: World Energy Outlook 2002 p. 97, wind power data from Windpower Monthly magazine

48 Werner Zittel von der Ludwig Bölkow Systemtechnik hat als einer der ersten die Fehlprognosen der IEA offen kritisiert. Mein Dank geht an ihn und an seinen Kollegen Jörg Schindler für ihre wertvolle Grundlagenarbeit im Bereich der Analyse fossiler Ressourcen.

49 ABI Research: Wind Turbines, Photovoltaics Winners in Distributed Generation Market, Oyster Bay, NY, Market Wire, 03/16/2004

50 Vgl. CATS, Compressed Air Technology System, www.mdi.lu

51 Alec N. Brooks: Perspectives on Fuel Cell and Battery Electric Vehicles, AC Propulsion, CARB ZEV Workshop December 5, 2002

52 Ulf Bossel: Efficiency of Hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles, http://www.efcf.com/reports

53 MDI: Etude comparative du Rendement Energetique en cycle urbain

54 Alec N. Brooks: Perspectives on Fuel Cell and Battery Electric Vehicles, AC Propulsion, CARB ZEV Workshop December 5, 2002

55 Für exakte HGÜ-Daten und -Kosten vgl.: Gregor Czisch: Global Renewable Energy Potential - Approaches to its Use, http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/folien/magdeb030901/ overview.html und Rudolf Rechsteiner: Grün gewinnt – Die letzte Ölkrise und danach, Orell Füssli Verlag AG, Zürich 2003

56 Die bisherigen Erfahrungen mit Mindestpreisgarantien zeigen, dass solche Einspeisetarife die Risikoprämien der Investoren und damit die Finanzierungskosten senken. Einspeisevergütungen liefern im Vergleich zu Quotenregelungen die besseren Resultate; bei gegebener Investitionssicherheit können die gesetzten Ziele in der Regel erreicht werden, was bei Quoten-Modellen regelmässig nicht der Fall ist.

57 Vgl. Czisch http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/folien/magdeb030901/overview.html

58 Dr. Richard E. Smalley: Testimony of R. E. Smalley to the Senate Committee on Energy and Natural Resources; Hearing on sustainable , low emission, electricity generation, April 27, 2004 http://energy.senate.gov/hearings/testimony.cfm?id=1129&wit_id=3343